

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ФАЛСАФА
ДОКТОРИ ИЛМИЙ ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ
PhD.30.08.2018.FM/T.01.12 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

БОБОЕВ АКРАМЖОН ЙЎЛДАШБОЕВИЧ

**$n\text{-(GaAs)-}p\text{-(GaAs)}_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(ZnSe)}_y$ ГЕТЕРОТУЗИЛМАСИНИНГ
ТУЗИЛМАВИЙ ХУСУСИЯТЛАРИ, ЭЛЕКТРОФИЗИК ВА
ФОТОЭЛЕКТРИК ХОССАЛАРИ**

01.04.10-яримўтказгичлар физикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PHD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент-2019

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)
диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по
физико-математическим наукам**

**Content of the dissertation abstract of the doctor of philosophy (PhD) on
physical and mathematical sciences**

Бобоев Акрамжон Йўлдашбоевич

n -(GaAs)- p -(GaAs) $_{1-x-y}$ (Ge $_2$) $_x$ (ZnSe) $_y$ гетеротузилмасининг тузилмавий
хусусиятлари, электрофизик ва фотоэлектрик хоссалари..... 3

Бобоев Акрамжон Йўлдашбоевич

Структурные особенности, электрофизические и фотоэлектрические
свойства гетероструктур n -(GaAs)- p -GaAs) $_{1-x-y}$ (Ge $_2$) $_x$ (ZnSe) $_y$ 21

Boboev Akramjon Yuldashboevich

Structural features, electrophysical and photoelectric properties of
 n - (GaAs)- p -GaAs) $_{1-x-y}$ (Ge $_2$) $_x$ (ZnSe) $_y$ heterostructures..... 39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works..... 43

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ФАЛСАФА
ДОКТОРИ ИЛМИЙ ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ
PhD.30.08.2018.FM/T.01.12 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

БОБОЕВ АКРАМЖОН ЙЎЛДАШБОЕВИЧ

**$n\text{-(GaAs)-}p\text{-(GaAs)}_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(ZnSe)}_y$ ГЕТЕРОТУЗИЛМАСИНИНГ
ТУЗИЛМАВИЙ ХУСУСИЯТЛАРИ, ЭЛЕКТРОФИЗИК ВА
ФОТОЭЛЕКТРИК ХОССАЛАРИ**

01.04.10-яримўтказгичлар физикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PHD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент-2019

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2019.2.PhD/FM69 рақами билан рўйхатга олинган.

Диссертация Андижон давлат университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (ispm.uz) ва «Ziynet» ахборот-таълим порталида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбари:

Йўлчиев Шаҳриёр Ҳусанович

физика-математика фанлари номзоди, доцент

Расмий оппонентлар:

Дадамирзаев Муҳаммаджон Ғуломқодирович

физика-математика фанлари доктори, доцент

Турғунов Нозимжон Абдуманнопович

физика-математика фанлари доктори, доцент

Етакчи ташкилот:

Фарғона давлат университети

Диссертация ҳимояси Ўзбекистон Миллий университети қошидаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти ҳузуридаги фалсафа доктори илмий даражасини берувчи PhD.30.08.2018.FM/T.01.12 рақамли илмий кенгашнинг 2019 йил «__» _____ соат ____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-уй. Тел.: (998 71) 248-79-94; Факс: (998 71) 248-79-92; e-mail: info@ispm.uz, ЎзМУ қошидаги ЯФМ ИТИ мажлислар зали).

Диссертация билан Ахборот технологияларини жорий этиш бўлимида танишиш мумкин. (__ рақам билан рўйхатга олинган.) Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-уй. Тел.: (998 71) 248-79-59; e-mail: info@ispm.uz.

Диссертация автореферати 2019 йил «__» _____ да тарқатилди.
(2019 йил “__” _____ даги ____ рақамли реестр баённомаси)

Ш.Б. Утамурадова

Фалсафа доктори илмий даражасини берувчи

Илмий кенгаш раиси ф.-м.ф.д., профессор

С.С. Насриддинов

Фалсафа доктори илмий даражасини берувчи

Илмий кенгаш котиби т.ф.д., доцент

А.Т. Мамадалимов

Фалсафа доктори илмий даражасини берувчи

Илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси

ф.-м.ф.д., профессор, академик

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Маълумки, бугунги кунда GaAs асосида олинган яримўтказгичли кўпқатламли гетеротузилмалар ўзининг мақбул иссиқликфизик тавсифи, электронларнинг юқори ҳаракатчанлиги, ман этилган соҳанинг етарлича кенглиги, шунингдек, заряд ташувчиларнинг тўғри соҳалараро ўтишнинг имконияти борлиги туфайли замонавий электрон техникасининг асосий элементларидан бири ҳисобланиб, унинг асосида қатор ноёб электрон ишланмалар ясалган. Лекин яримўтказгичли микроэлектрониканинг жадал ривожланиши, нанотехнология, наноматериаллар ва наноэлектроника каби янги йўналишларнинг пайдо бўлиши, оммавий ишлаб чиқарилаётган электрон ишланмаларининг функционал имкониятларини кенгайтиришни, янги материаллар қидириб топишни, шунингдек, ноёб физик хусусиятли икки ва кўптаркибли қаттиқ қоришмалар олиш техноло-гияларини ишлаб чиқишни талаб этмоқда.

Жаҳонда бугунги кунда етакчи илмий марказларда олимлар ва мутахассислар нисбатан кенг фойдаланилаётган яримўтказгичли материалларни ёки улар асосидаги кўп қатламли тузилмаларни функционал имкониятларини кенгайтириш ёки янгиларини ишлаб чиқиш муаммоларини ўрганишга катта эътибор қаратмоқдалар. Яримўтказгичли технологиялар институти (Германия Штутгарт университети) ва А.Ф. Иоффе номидаги Физикатехника институтидаги тадқиқотлар кўп қатламли яримўтказгичли тузилмаларни олиш технологиялари ва уларнинг қўлланиши, фотосезгирлик соҳасини бошқариш, базавий яримўтказгич тури ва олиниш технологиясига мос ҳолда турли хил қатламлар бўлиниш чегараларидаги физик жараёнлар механизмларини аниқлаш улкан мувоффақиятларга эга бўлмоқда ва тадқиқотларнинг келгуси ривожига бундай изланишлар катта аҳамиятга эга.

Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантиришнинг “Ҳаракатлар стратегияси”га кўра илмий ва инновация ютуқларни амалиётга жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш масалаларига алоҳида эътибор қаратилмоқда. Жумладан, яримўтказгичли оптоэлектроника ва нанотехнология, шунингдек, квант ўлчамли кўпқатламли гетеротузилмаларни яратиш жадал ривожланиб бормоқда. Бундай технологик жараёнлар замонавий эпитакия (газ фаза, молекуляр нурли, суюқ фаза ва бошқалар) усуллари ишлаб чиқишни, ҳамда наноўлчамли тузилмалар яратишни талаб қилмоқда.

“Фаол инновациялар ва ижтимоий ривожлантириш йили”да олинаётган илмий натижаларнинг сифатини замонавий талаблар даражасига кўтаришга асосий эътибор қаратилмоқда. Жумладан, нанообъект, кўптаркибли гетеротузилмалар олишнинг технологик шарт-шароитлари, уларнинг физик хусусиятларини тадқиқ қилиш ва микроэлектрон ва оптоэлектрон маҳсулотлар саноатига тадбиқ қилиш яримўтказгичлар физикаси ва техникасининг замонавий босқичининг долзарб муаммоси ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил, 7 февралдаги ПҚ-4947-сон “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги, 2017 йил, 13 февралдаги ПҚ-2772-сон

“2017-2021 йиллар электрон саноатини ривожлантиришнинг устивор йўналишлари тўғрисида” ги Қарорларида, 2017 йил, 17 февралдаги ПҚ-2789-сонли “Фанлар академияси фаолиятини янада такомиллаштириш, илмий ишларни ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштириш бўйича чора тадбирлар тўғрисида” ги Қарорларида ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертацияда олиб борилган тадқиқотлар муайян даражада мос келади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг III. «Энергетика, энергоресурс тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника ва электрон асбобсозлиги ривожланиши»нинг устувор йўналишига доир бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Бугунги кунга қадар олимлар ва оптоэлектрон курилмаларни ишлаб чиқарувчилар қаттиқ қоришмаларни ўстириш технологияси ва тадқиқотларига, гетеротузималарда юз берадиган электрон жараёнларни текшириш ва уларнинг физик қийматларини оптималлаш усулларини ишлаб чиқишга етарлича эътибор бермаяптилар. Шундай гетеротузилмаларнинг бири $p\text{-GaAs-}n\text{-(GaAs)}_{1-x}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(ZnSe)}_y$ фотосезгир материали ҳисобланиб, у инфрақизил ва кўзга кўринувчи нурланиш спектри соҳасида ишловчи танланган фотоқабулқилгичнинг янги синфи сифатида хизмат қилади.

Таъкидлаш жоизки, халқаро миқёсда сўнги 20 йил мобайнида бу борада кенг кўламли ишлар олиб борилди, жумладан Ж.И. Алферов ва унинг шогирдлари GaAs бирикмаси асосида, молекуляр нурли эпитаксия усулида InGaAs, InAs ва GaSb квант нуқталарини олишди ва улар асосида инжекцион лазерлар тайёрлаш имкониятини кўрсатиб бердилар¹. Бинг Ли Гу бошчилигидаги япон олимлари², В.М. Андреев³, М.М. Гадзалиев⁴ ва В.С. Вартамянлар⁵ бошчилигидаги рус олимлари томонидан GaAs тагликларида $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ эпитаксиал қатламлари олинган ва уларнинг кристаллик ва соҳавий тузилиш, электрофизик ва оптик хоссалари ўрганилган. М, Фунато⁶,

¹Леденцов Н.Н., Устинов В.М., Шукин В.А., Копьев П.С., Алферов Ж.И., Бимберг Д. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры. Физика и техника полупроводников, 1998, том 32, № 4, стр.385-410.

²Bing-Lin Gu, Jun Ni, and Jia-Lin Zhu Structure of the alloy $(\text{GaAs})_{1-x}\text{Ge}_{2x}$ and its electronic properties, Phys. Rev. B, 1992. Vol. 45, Issue 8, pp. 4071.

³V.M. Andreev, V.P. Khvostikov, N.A. Kalyuzhnyi, S.S. Titkov, O.A. Khvostikova, M. Z. Shvarts. GaAs/Ge heterostructure photovoltaic cells fabricated by a combination of MOCVD and zinc diffusion techniques. Semiconductors, 2004, Vol. 38, Issue 3, pp 355–359.

⁴M.M. Gadzhaliyev, Z.Sh. Pirmagomedov, T.N. Éfendieva, The effect of a thermoelectric field on a current-voltage characteristic of the $p\text{-Ge-}n\text{-GaAs}$ heterojunction. Semiconductors. 2004, Vol. 38, Issue 11, pp 1302–1303.

⁵Вартамян Р.С. Электрофизические, оптические и люминесцентные свойства метастабильных твердых растворов $(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs})_{1-x}$ и гетеропереходы на их основе. Дисс. канд.физ.-мат.наук. Ленинград: ФТИ, 1984, 181 с.

⁶M. Funato, “Title control of interface properties in ZnSe-GaAs heterovalent heterostructures grown by metalorganic vapor phase epitaxy,” Dissertation, Kyoto University, Kyoto, Japan, 2000. P. 157.

Х. Фаррел ва Р. Лавиолет⁷ каби дунёнинг етакчи олимлари томонидан GaAs/ZnSe гетеротузилмаси олинган ва уларнинг тузилмавий ҳамда фазовий боғланиш конфигурацияси ўрганилган. Шунингдек, Ёнг Бинг Ёи бошчилигидаги Хитой олимлари томонидан GaAs/InAs-GaAs/ZnSe гетеротузилмалари асосида квант нуктали қуёш элементларини оптималлаштиришнинг қулай меъёрлари ўрганилган⁸.

Шунингдек, Ўзбекистонда ҳам бу борада академик М.С. Саидов, профессор А.С. Саидов ва уларнинг шогирдлари томонидан бир қатор илмий ишлар қилинди. GaAs бирикмаси асосида $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$, $(\text{ZnSe})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ ⁹ ва $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ ¹⁰ диод тузилмалари олинди, профессор А.В. Каримов ва унинг раҳбарлигидаги илмий гуруҳ томонидан GaAs тагликлари GaAlGaAs қатламларини ўстириб, фотодиод тузилмалари ҳосил қилинди¹¹.

Ўз навбатида, олдиндан белгиланган параметрли, кўп таркибли гетеротузилмалар олиш ва уларнинг катта қизиқиш уйғотаётган физик хусусиятларини тадқиқ қилиш аҳамият касб этмоқда. Технологияларнинг ривожланиши ва қурилмаларнинг ўлчаш аниқлигини ортириш ўрганилаётган тузилмалар хоссалари ва имкониятлари ҳақида янги маълумотларни намоён қилмоқда. Бунга қарамадан, $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ асосида гетеротузилмаларнинг қатор тузилмавий хусусиятлари ва алоҳида электрофизик, фотоэлектрик хоссалари ҳали охиригача аниқланмасдан қолмоқда, шунингдек, квант нанообъектларнинг шаклланиши, уларнинг зичлиги, шакли ва ўлчамларига ўстириш ҳарорати оралиғи, совутиш тезлиги ва бошқа технологик меъёрлар таъсирларини ўрганишга бағишланган амалий тадқиқотлар фундаментал тарзда олиб борилмаган.

Тадқиқотнинг диссертация иши бажарилган муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Андижон машинасозлик институти илмий-тадқиқот ишлари режасининг Ф-2-001 «Радиация таъсирида GaAs/Ge/ZnSe яримўтказгичли қаттиқ қоришмасида фотосезгирлик ва заряд ташувчиларнинг ўтиши». (2016 й.); Андижон давлат университети ОТ-Ф2-68 «Кристалларда қоришма-нуксон микро ва нанобирикмаларининг шаклланиши механизмлари ва кенг функционал имкониятли, кўп таркибли тузилмалар ҳосил қилишда уларнинг аҳамияти» (2012-2016 йй.) фундаментал лойиҳалари доирасида бажарилган.

⁷H.N. Farrell and R. A. LaViolette, "Cation variations at semiconductor interfaces: ZnSe(001)/GaAs(001) superlattices," Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2004. Vol. 22, Issue. 4, pp. 2250–2256.

⁸Jiang Bing-Yi, Zheng Jian-Bang, Wang Chun-Feng, Hao Juan, Cao Chong-De Optimization of quantum dot solar cells based on structures of GaAs/InAs-GaAs/ZnSe. Acta Phys. Sin. 2012, Vol. 61, Issue. 13. pp. 1-6.

⁹А.С. Саидов, Э.А. Кошчанов, А.Ш. Раззаков. О возможности улучшения структурного совершенства новых гетеропар $\text{GaAs}-(\text{Ge}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$, $\text{Ge}-(\text{Ge}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$, $\text{GaP}-(\text{Ge}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$, $\text{Si}-(\text{Ge}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$. Письма в ЖТФ, 1998, том 24, № 2 ст 12-16.

¹⁰Saidov A.S. et.al. Growth of $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ solid solution films and investigation of their structural and some photoelectric properties. Physics of the Solid State, 2011, Vol. 53, Issue. 10, pp. 2012–2021.

¹¹А.В. Каримов, Д.М. Ёдгорова, Некоторые особенности получения фототока в одно- и многобарьерных фотодиодных структурах Физика и техника полупроводников, 2010, Том 44, Вып. 5. стр. 674-679.

Тадқиқотнинг мақсади. $n\text{-(GaAs)}\text{-}p\text{-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ гетеротузилмасининг тузилмавий хусусиятларини, электрофизик ва фотоэлектрик хоссаларини тадқиқ қилиш.

Тадқиқотнинг вазифалари:

калай аралашма эритмасидан $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ эпитаксиал қатламини олишнинг энг қулай шарт-шароитларини баҳолаш ва олинган плёнкаларнинг электрофизик қийматларини аниқлаш;

олинган $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ эпитаксиал қатламининг тузилмавий хусусиятларини тадқиқ қилиш;

$\text{GaAs}_{1-x}\text{Ge}_x$ буфер қатлами ҳажмида ва юзасида Ge ва ZnSe нанокристалларининг хоссалари ва шаклланиш механизмларининг тадқиқ қилиш;

олинган $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ эпитаксиал қатламининг сиртий ҳолатларини ўрганиш ва ZnSe нанооролчаларининг геометрик шакли ва зичлигини аниқлаш;

$n\text{-GaAs-}p(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ кўптаркибли гетеротузилманинг электрофизик ва фотоэлектрик хоссаларини тадқиқ қилиш.

Тадқиқотнинг объекти $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ эпитаксиал қатламлари ва улар асосидаги $p\text{-}n$ ўтишлар.

Тадқиқотнинг предмети $p\text{-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ қаттиқ қоришмасининг тузилмавий мукамаллигини баҳолаш, фундаментал параметрларини аниқлаш ва $n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ гетеротузилмаларда ток ўтиш механизмларини текшириш ва уларнинг спектрал фотосезгирликларини шакллантириш.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида $n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ кўптаркибли гетеротузилмасини олиш учун суяқ фазали эпитаксия усулидан, тузилмавий тадқиқотларда рентгендифрактометр усулидан, морфологик тадқиқотларда атомий куч микроскопидан, вольт-ампер тавсифини текширишда ўлчаш қурилмалари мажмуасидан ва спектрал тавсифини аниқлашда оптик нурларни ютувчи усуллардан, солиштирма қаршилиқни текширишда тўрт зондли усуллардан фойдаланилди.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйдагилардан иборат:

(100) тартибли монокристалл $n\text{-GaAs}$ тагликларга суяқ фазали эпитаксия усулида p -типли $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ эпитаксиал қатламлари илк бор ўстирилди;

олинган $(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ эпитаксиал қатламлар таглик тартибланишига мос равишда (100) тартибли, блок ўлчамлари 52 нмли монокристал ҳисобланиб, сфалерит тузилишга эга эканлиги исботланди;

Ge_2 молекулалари GaAs молекулалари билан қисман ўрин алмашган ҳолда жойлашиб, асосий панжара блокларини шакллантириши ва блокларнинг бўлиниш чегараси бўйлаб нуқсонга мойил соҳаларида ортиқча Ge атомлари ўлчами 44 нм бўлган нанокристалларни шакллантириши аниқланди;

$(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ эпитаксиал қатламининг сиртида 59 нмли ZnSe нанооролчалари шакланганлиги илк бор аниқланди;

квант нанообъектларини зичлиги, шакли ва ўлчами технологик меъёрларига (ўсиш температураси оралиғига, совутиш тезлиғига) боғлиқлиги аниқланди;

$n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{0.69}\text{(Ge}_2\text{)}_{0.17}\text{(ZnSe)}_{0.14}$ гетеротузилмасининг вольт-ампер тавсифининг тўғри йўналишида токнинг қиялик бурчаги билан фарқланувчи Ge ва ZnSe нанокристаллари билан боғлиқ бир қанча соҳалар аниқланди;

$(\text{GaAs})_{1-x}\text{(Ge}_2\text{)}_x$ қатламда Ge ва ZnSe нанокристаллари молекулаларининг ионланиш энергиялари қийматлари фарқи туфайли $(\text{GaAs})_{1-x-y}\text{(ZnSe)}_x\text{(Ge}_2\text{)}_y$ эпитаксиал қатламининг танловчи фотосезгирликка эга эканлиги аниқланди.

Тадқиқотнинг амалий натижалари. $n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{0.69}\text{(Ge}_2\text{)}_{0.17}\text{(ZnSe)}_{0.14}$ гетеротузилмаси янги яримўтказгичли материал ҳисобланиб, у инфрақизил ва кўринувчи нурланишлар спектри соҳасида ишловчи танловчи фотоқабулқилгичлар учун фотоэлемент сифатида фойдаланиш мумкин.

Тадқиқот натижаларининг ишончилиги: яхши синалган экспериментал ва мустақил усуллар мажмуаларидан фойдаланилганлиги; олинган натижаларнинг такрорланиши; ўхшаш ҳодисалар ҳақидаги умумий физик тасаввурларга зид эмаслиги; умумий физикавий қонуниятлар билан визуал кузатишларнинг мос келиши.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Яримўтказгичли материалшунослик ва электрон асбобсозлик учун назарий ва амалий қизиқишларни намоён қилган, инфрақизил ва кўринувчи нурланишлар спектри соҳасида ишловчи танловчи фотоқабулқилгич материалларни яратишда физикавий асос ҳисобланади ва кўптаркибли гетеротузилмаларда юз берадиган ҳодисалар механизми ҳақидаги илмий тасаввурларни кенгайтиради.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.

ZnSe нанообъектларининг геометрик шакли ва ўлчамлари аниқлаш ва уларнинг шаклланиш механизмларини баҳолаш, шунингдек, ZnSe нанокристалларида ток ўтиш механизмларни аниқлаш усуллари Қорақалпоқ давлат университети Ф-2-37 рақамли “Яримўтказгичларда нуқсонларни шакллантирадиган лазер-индукциявий ночизикли жараёнларнинг ўзига хослиги” мавзусидаги лойиҳада қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигидан 2018 йил, 24 майда олинган 89-03-2001 рақамли маълумотномаси).

Квант нанообъектларининг ўлчами, шакли ва уларнинг зичликлари технологик меъёрларга (ўсиш ҳарорати оралиғига ва совутиш тезлиғига) боғлиқлигини аниқлаш усуллари Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси Ядро физикаси институти Ф2-ФА-Ф120 рақамли “Кичик ўлчамли юқори ҳароратли ўта ўтказгичлар, яримўтказгичли гетеротузилмалар, металл ва уларнинг оксидларининг электрон хоссалари ва радиациявий такомиллаштирилиши” мавзусидаги лойиҳада қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академиясидан 2019 йил, 24 июнда олинган 2/1255-1772 рақамли маълумотномаси).

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг асосий натижалари 4 та халқаро ва 4 та республика миқёсидаги илмий амалий анжуманларда муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси доирасида жами 19 та илмий иш нашр қилинган, жумладан 8 та мақола Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш учун тавсия этилган илмий нашрларда чоп этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, тўртта боб, хулосадан ташкил топган. У 121 саҳифада ифодаланиб, 13 та расмларни, 5 та жадвалларни ва 100 та фойдаланилган адабиётлар рўйхатини ўз ичига олади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурияти асосланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, диссертация мавзуси бўйича халқаро илмий тадқиқотлар натижалари таҳлили келтирилган, муаммонинг ўрганилганлик даражаси, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объект ва предметлари тавсифланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиқ берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

“(GaAs)_{1-x-y}(Ge₂)_x(ZnSe)_y эпитаксиал қатламларини ўстиришнинг замонавий ҳолатлари” номли биринчи бобда (GaAs)_{1-x-y}(Ge₂)_x(ZnSe)_y эпитаксиал қатламларини ўстиришнинг замонавий ҳолатлари тадқиқотлари бўйича муаммолар ва ривожланиш тамойиллари таҳлил қилинган. Тегишли назарий ва экспериментал маълумотлар асосида вазифаларнинг ечимлари шакллантирилган.

“Тадқиқотнинг экспериментал усуллари” номли иккинчи бобида атомлари ўрин алмашган ҳолда жойлашувчи (GaAs)_{1-x-y}(Ge₂)_x(ZnSe)_y узлуксиз қаттиқ қоришмаларни шаклланишининг термодинамик шароитлари ўрганилган ва ишлаш жараёнида фойдаланилган асбоб ва қурилмаларнинг тавсифлари келтирилган.

(GaAs)_{1-x-y}(Ge₂)_x(ZnSe)_y қаттиқ қоришмали эпитаксиал қатламлар суяқ фаза эпитаксия усулида чегараланган ҳажмли аралашма эритмасидан горизонтал жойлаштирилган тагликли вертикал кварц реакторида ўстирилди. Таглик сифатида диаметри 20 мм, қалинлиги 350 мкм ва солиштирма қарши-лиги 250 Ом·см бўлган сиртининг кристаллографик йўналиши (100) тартибига мос келувчи, *n*-тур ўтказувчанликка эга GaAs монокристаллидан кесиб олинган пластинкалардан фойдаланилди. Аралашма эритма таркиби Sn-GaAs-Ge-ZnSe системасини дастлабки ўрганишлар асосида танлаб олинди. Энг яхши қийматли эпитаксиал қатламлар кристалланиш ҳарорати 730 - 640 °C оралиғида ва совитиш тезлиги 1,5 град/минда олинди.

Ўстирилган пленкалар солиштирма қаршилиги 0,1 Ом·см, кавакли ўтказувчанликка эга ва қалинлиги 10 мкмни ташкил қилади¹².

$n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(ZnSe)}_y$ тайёрланган гетеротузилмасининг физик хусусиятларини тадқиқ қилиш учун стандарт текширув асбоблари ва қурилмаларидан: дифрактометр (ДРОН-3М); атомий куч микроскопи (Solver Next); монокроматор (CARL ZEIS JENA) ва бошқа электрофизик ўлчовчи қурилмалардан фойдаланилди.

“GaAs тагликлари асосидаги $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ қаттиқ қоришмаларнинг рентгенодифракцион ва электромикроскопик тадқиқотлари” номли учинчи бобида GaAs таглиги ва ўстирилган $(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ эпитаксиал қатламининг тузилмавий тадқиқотлари, шунингдек, ушбу қаттиқ қоришмаларни электронмикроскопик тадқиқотлари келтирилган.

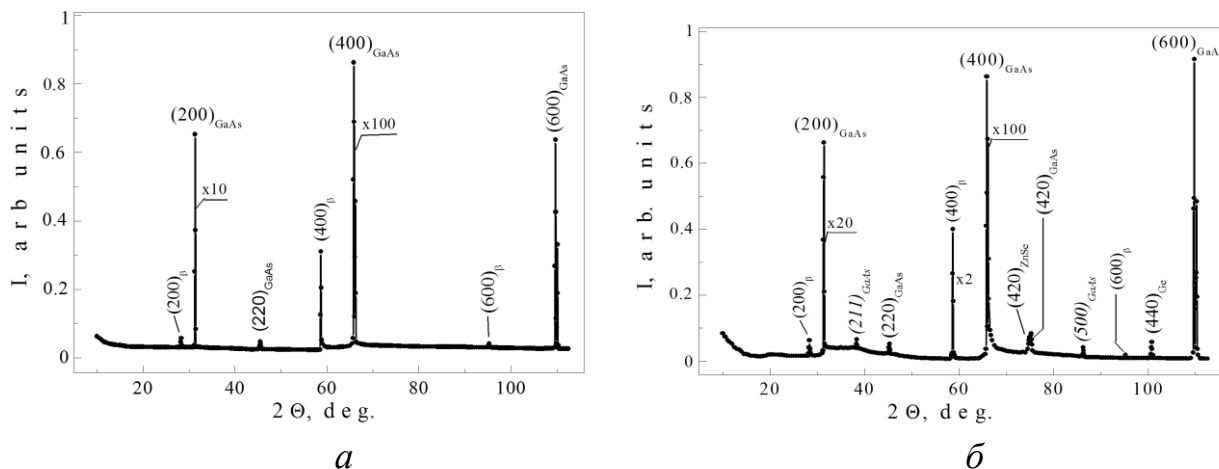
1-а расмда GaAs таглигининг рентгенограммаси келтирилган. Дифракциявий расмда интенсивлик қатталиклари бўйича турлича бўлган бир нечта ингичка тузилмавий чизиқлар пайдо бўлиши кўрсатилган. Рентгенограммада юқори интенсивликдаги $\{H00\}$ туридаги, яъни $(200)_{\text{GaAs}}$, $(400)_{\text{GaAs}}$ ва $(600)_{\text{GaAs}}$ ингичка тузилмавий чизиқлар пайдо бўлган. Таҳлиллар асосида тагликнинг сирти (100) кристаллографик текислигига мос келишини кўрсатилди. Экспериментал равишда тагликнинг панжара қиймати катталиги $a_{\text{GaAs}} = 5,6532 \text{ \AA}$ га тенглиги ва уни жадваллардаги стандарт қийматига $a_{\text{GaAs}} = 5,646 \text{ \AA}$ жуда яқинлиги аниқланди¹³.

1-б расмда $(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ эпитаксиал қатламининг рентгенограммаси кўрсатилган. У таглик рентгенограммасидан сезиларли фарқ қилиб, унда янги тузилмавий чизиқларнинг пайдо бўлиши, ноэластик фон сатҳини но-монотон характерга эгалиги, шунингдек, (200) , (400) ва (600) асосий тузилма чизиқларининг интенсивликлари мос равишда ортганлиги кузатилган. Юқоридаги ҳолат бир қанча галлий арсениди молекулалари билан германий жуфт атомлари арсенид галлий панжараларининг нуқсонга мойил соҳаларида қисман ўрин алмашган ҳолда жойлашаётганлиги туфайлидир. Бу ҳақида (200) , (400) ва (600) асосий тузилма чизиқларининг экспериментал натижалари ёрдамида плёнканинг панжара қиймати катталиги $a_f = 5.6568 \text{ \AA}$ аниқланганда, тагликнинг панжара қийматидан катта эканлиги ҳам тасдиқлайди. Бу эса тадқиқ этилаётган қаттиқ қоришманинг асосий панжарасини иккита GaAs ва Ge, яъни $\text{GaAs}_{1-x}\text{Ge}_x$ дан ташкил топганлигини кўрсатади. Бу хулосани плёнка рентгенограммасини ноэластик фон сатҳи таглик рентгенограмма ноэластик фон сатҳидан нисбатан 22 % га ортганлиги тасдиқлайди. Бу эса пленка панжарасида германий атомларининг бир маромда тақсимланмаганлиги туфайли маҳаллий характердаги механик кучланишларни тўпланиши ҳақида далолат беради ва буни (220) и (440)

¹²С.З. Зайнабидинов, Ш.Х. Йулчиев, А.Й.Бобоев, Х.А. Махмудов, М.Кучкарова. Особенности выращивания эпитаксиального слоя твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$. Научный вестник АндГУ, 2019, № 1. ст. 5-8.

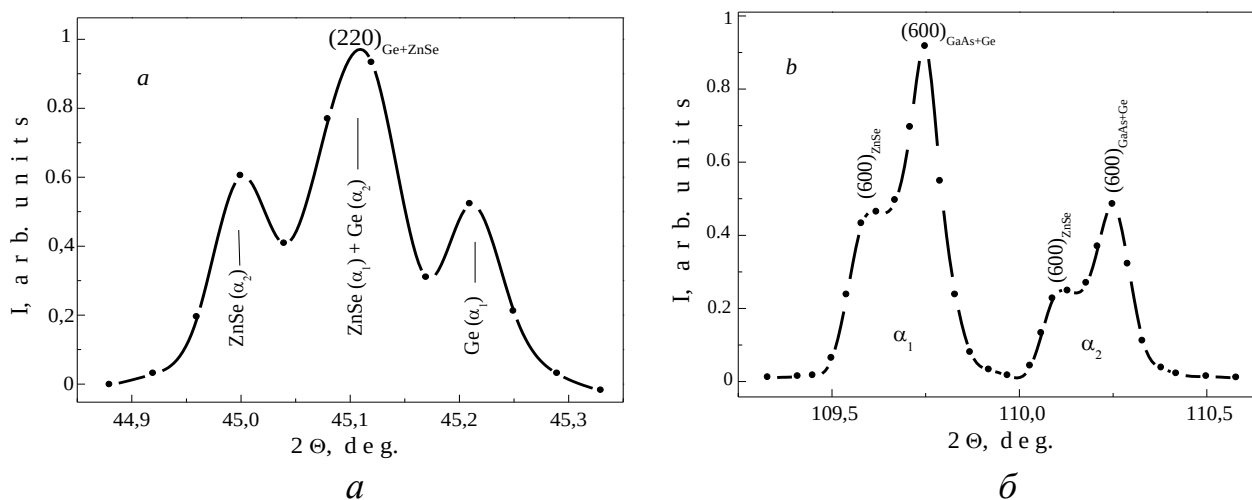
¹³Краткий справочник физико-химических величин. Под ред. А. А. Равделя и А. М. Пономаревой. Л.: Химия, 1983. С.138.

кристаллографик текислигида, яъни асосий тузилма чизиқлардан бошқа йўналишда тартибланган Ge нанокристаллининг икки дифракцион тузилма чизиқлари пайдо бўлиши тасдиқлайди.



1-расм. GaAs таглик (а) ва $(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ эпитаксиал қатлам (б) рентгенограммаси

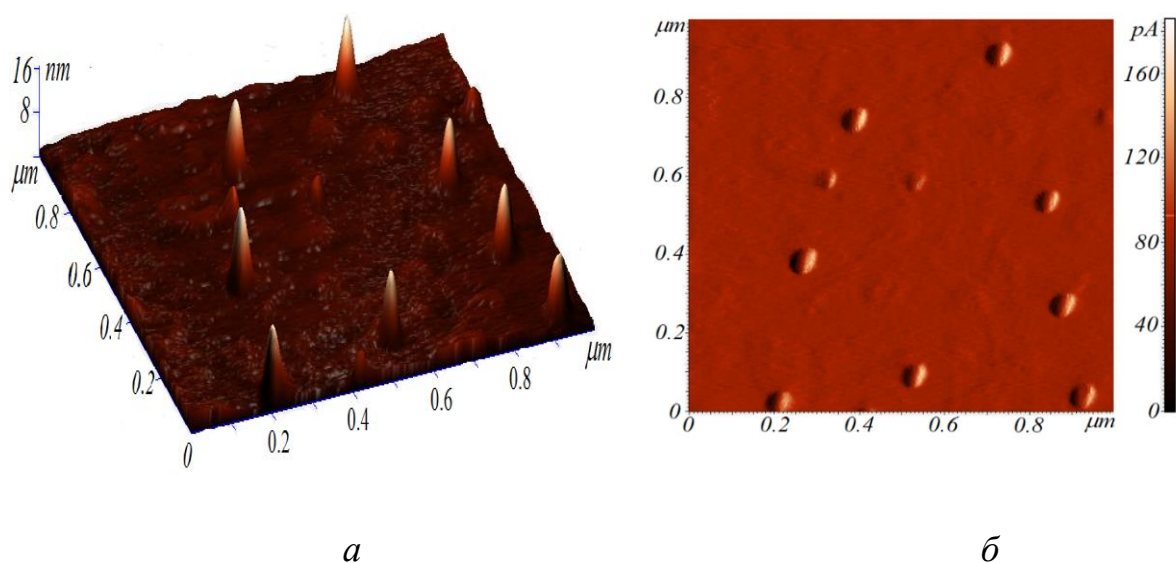
2-а расмда Ge ва ZnSe нанокристаллитларининг бир хил тартибланишидан α_1 ва α_2 нурланишлари бўйича икки тузилмавий чизиқдан шаклланган, учлик шаклига эга бўлган тузилмавий чизиғи кўрсатилган. Таҳлиллар кўрсатишича, GaAs панжарасида Ge киришмаси бир хил тақсимланмайди ва бу киришма асосий панжаранинг нуқсонга мойил соҳаларида 44 нмли Ge нанокристаллини ўз-ўзидан шакллантиради. Ge нанокристаллининг панжара қийматини рентгенограммада аниқланганда, $a_{\text{Ge}} = 5,6625 \text{ \AA}$ ни ташкил этди. Рентгенограммада яна тегишли интенсивликда иккита тузилмавий чизиқ кузатилган (1-б расм). Таҳлиллар улар (220) ва (420) ZnSe нанокристаллига тегишли эканлигини кўрсатди. Уларнинг ўсиш йўналиши турли бўлишига қарамасдан, бу нанокристалларни ўлчамлари деярли бир хил 59 нмни ташкил этди.



2-расм. $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ эпитаксиал қатламнинг (220) (а) ва (600) (б) шаклидаги дифракция аксланиши.

Бу маълумот ZnSe молекулалари $\text{GaAs}_{1-x}\text{Ge}_x$ қаттиқ қоришмаси сиртида нанооролча, яъни квант нуқта шаклида ўсиши ҳақида хулоса қилиш имконини беради. Айнан (600) шаклдаги дифракция аксланиши бу ҳақида далолат бериб, у $\text{GaAs}_{1-x}\text{Ge}_x$ ва ZnSe панжаралари учун мос равишда α_1 ва α_2 таркибли нурланишлари бўйича дифракция аксланишининг кенгайяётганлигини тасдиқлайди (2-б расм). GaAs ва ZnSe панжараси қийматларини экспериментал аниқланган қиймати $a_{\text{ZnSe}} = 5,6697 \text{ \AA}$ и $a_{\text{GaAsGe}} = 5,6697 \text{ \AA}$ ни ташкил этиб, уларнинг жадвалдаги $a_{\text{ZnSe}} = 5,661 \text{ \AA}$ и $a_{\text{GaAs}} = 5,646 \text{ \AA}$ қийматларига мос равишда тенг эканлиги тасдиқланди¹⁴.

3-а расмда ўстирилган $(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ эпитаксиал қатламининг уч ўлчамли тасвири атомий куч микроскопи ёрдамида олинган тадқиқот натижалар келтирилган. Расмда қатлам ўсаётган вақтда, унинг сирти бўйлаб баландлиги 12 м ва кенлиги 55÷65 нмли оролчалар шаклланиши кўрсатилган. Тадқиқотлар улар қаттиқ қоришмани таркибий қисмидан шаклланиб, квант нуқталар эканлигини кўрсатади. Атомий куч микроскопидан олинган маълумотлар ёрдамида $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ қаттиқ қоришмаси сиртида ўсаётган ZnSe нанооролчалари гумбазсимон геометрик шаклга эга бўлиб, асоси айланадан иборат бўлган, ёнбош ўлчамлари 50 нанометрдан 90 нанометргача бўлган *dome*-оролча¹⁵ деб номланувчи нанокристал эканлиги аниқланди (3-а расм).



3-расм. $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ эпитаксиал қатлам сиртининг уч ўлчамли тасвири (а) ва ZnSe нанообъекти маҳаллий ўтказувчанлик харитаси (б).

3-б расмда атомий куч микроскопи ёрдамида кантакт усулида олинган $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ эпитаксиал плёнкаси сиртидан ZnSe нанообъектларининг маҳаллий ўтказувчанлигининг тадқиқот натижалари келтирилган. Белги-ланган топографияли параллел ўтказилган қаршиликнинг ортишини маҳаллий қиймати текширилган. Расмдан ёруғ соҳаларда кўп ток оқаётгани

¹⁴Sheng S. Лю. Semiconductor Physical Electronics. - Second Edition. - Springer, 2006. - 708 с.

¹⁵Дубровский В.Г., Теория формирования эпитаксиальных наноструктур. Москва: Физматлит: 2009, С. 486.

ва улар нисбатан кичик қаршиликларга эга эканлигини кўриш мумкин. Олинган маълумотлар ZnSe нанооролчалари $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ қаттиқ қоришма билан таққосланганда, юқори ўтказувчанликка эга эканлигидан далолат беради. Агар квант нукта GaAs ёки Ge нисбатан кенг соҳали ZnSe нанооролчаларидан иборат бўлса, нанообъектлардан заряд ташувчиларнинг ўтиши осон бўлади.

Ўстириш жараёнида етарлича зич ва хусусиятлари бўйича бир жинсли квант ўлчамли объектлар ансамблини яратишга эришилди. Бундай ансамбллар атомий куч микроскопи ёрдамида олингандан кўра юқорироқ ўтказувчанликка эга бўлган матрицадан иборат бўлади¹⁶. Шунингдек, суюқ фазада эпитаксия усули $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ қаттиқ қоришма сирти бўйлаб ва юзасида ZnSe квант нукталарини олиш имконини беради.

“ n -GaAs- p -(GaAs) $_{1-x-y}$ (Ge $_2$) $_x$ (ZnSe) $_y$ гетеротузилмасининг бир қатор электрофизик ва фотоэлектрик хоссалари” номли тўртинчи бобида тайёрланган гетеротузилманинг турли ҳароратларда қоронғуликдаги вольт-ампер тавсифи ва фотосезувчанлиги спектрал боғланишининг тадқиқот натижалар келтирилган.

Тадқиқ қилинаётган қалинлиги 10 микрометр қатламли гетеротузилмаси вольт-ампер тавсифининг бошланғич соҳасида нолдан 0.25 В гача омик, яъни $J \sim V$ боғланишга эга бўлган соҳа кузатилди (4-а расм). Берилаётган кучланишининг 0.25 В дан 0.4 В гача оралиғида вольт-ампер тавсифининг

$$I \approx I_0 \cdot e^{\frac{qV}{ckT}}. \quad (1)$$

ифода билан тавсифланадиган экспоненциал боғланиши кузатилди. Бу ерда I_0 экспоненция олд катталиги ва экспонентдаги “с” кўрсаткич экспериментал натижалар ёрдамида олинган

$$c = \frac{q}{kT} \cdot \frac{V_2 - V_1}{\ln \frac{I_2}{I_1}} \quad (2)$$

ифода билан аниқланди. Экспоненциал боғланиши В.И.Стафеев¹⁷ томонидан яратилиб, кейинчалик А.Ю. Лейдерман¹⁸ томонидан экспонентадаги “с” кўрсаткич учун

$$c = \frac{2b + ch(d / L_p) + 1}{b + 1} \quad (3)$$

¹⁶С.З. Зайнабидинов, А.Й.Бобоев. Морфологические исследования особенностей наностроек ZnSe на поверхности твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$. ЎзФА маърузалари. 2018. №4, С. 17-21.

¹⁷Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов М.: Радио и связь, 1990. С.264.

¹⁸А.Ю.Лейдерман. Рекомбинацию и релаксационные процессы в полупроводниках с примесными комплексами. В кн: Физика и материаловедение полупроводников с глубокими уровнями. М., Металлургия, 1987, С. 232.

ифодаси таклиф этилган, бу ерда b -электрон ва ковак ҳаракатчанликлари нисбати, d -катлам базаси қалинлиги ва L_p заряд ташувчиларнинг диффузион югуриш йўли. Вольт-ампер тавсифининг экспоненциал боғланишидан турли ҳароратларда 1-жадвалда¹⁹ келтирилган I_0 , c ва b ларнинг қийматлари аниқланди. Жадвалда келтирилган маълумотлардан 25-100°С ҳароратларда I_0 (А) қиймати текис ортганлиги, c ва b ларнинг қийматлари эса деярли ўзгармаган-лигини кўриш мумкин. 125°Сда уларнинг қийматлари сезиларли даражада ортганлиги кузатилди. 125°С ҳароратда ток ташувчиларни таркатиб юборувчи ва уларнинг ҳаракатчанлигини ўзгартирувчи турли зарядланган марказлар шаклланиши мумкинлиги исботланди.

1-жадвал.

I_0 экспоненсия олд катталиги, «с» экспонента кўрсаткичи ва турли ҳароратларда $n(\text{GaAs})\text{-}p(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ гетеротузилмаси учун электрон ва ковак ҳаракатчанликлари нисбати.

$t, ^\circ\text{C}$	25	50	75	100	125
$I_0, (\text{A})$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$3,63 \cdot 10^{-6}$	$4,43 \cdot 10^{-6}$	$6,73 \cdot 10^{-6}$	$5,54 \cdot 10^{-6}$
C	9,56	9,65	9,55	9,62	10,55
B	3,1	3,05	3,14	3,102	5,38

4-б расмда $V > 0,5$ В кучланишларда $J \sim V^\alpha$ (бу ерда кучланиш ортиши билан α нинг қиймати 2 дан 3 гача ўзгарадиган) кўринишидаги даражали боғланиш билан ифодаланувчи бу тузилмаларнинг вольтампер тавсифи кўрсатилган. Биринчи соҳа $J \sim V^2$ кучланишнинг 0.5 дан 1.7 В гача оралиғида кузатилди ва бу соҳани ҳажмий заряднинг омик релаксация дрейф механизми назарияси асосида тушунтириш мумкин²⁰. Кучланишнинг давомли ортиши билан токнинг $J \sim V^{2,7}$ кўринишидаги тез ортиши кузатилди. Бу ерда комплекс-лараро электрон алмашинуви натижасида рекомбинацион жараёнларнинг кечикишига олиб келувчи жараёнлар аҳамият касб этиб, вольт-ампер тавсифининг бу соҳаси

$$V = \frac{(b+1)d^2 N_R}{N_D \mu_p \tau_i} + \frac{d}{q \mu_p (b+1) C} \sqrt{J} - \frac{2(b+1)N_R d^2 c_n}{N_D \mu_p \alpha \tau_i C} \frac{1}{\sqrt{J}} = A + B\sqrt{J} - \frac{D}{\sqrt{J}} \quad (4)$$

аналитик ифода билан тавсифланади. Вольтампер тавсифининг бу боғланишидан ионлашган атомларнинг чуқур киришмалар концентрациясига N_D , электрон ва ковак ҳаракатчанликларининг нисбатига b , қатламлараро ўтувчи база қалинлигига боғлиқ бўлган A , B ва D қийматлар аниқланди. 2-жадвалда A , B ва D катталиклари қийматлари ҳароратга боғлиқлиги келтирилган²¹.

¹⁹Zainabidinov, et. al. Growth, Structure, and Properties of GaAs-Based $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ Epitaxial Films //Semiconductors, 2016, Vol. 50, No. 1, pp. 59–65.

²⁰М.Ламперт, П.Марк. Инжекционные токи в твердых телах. М.,Мир. 1973. стр 413.

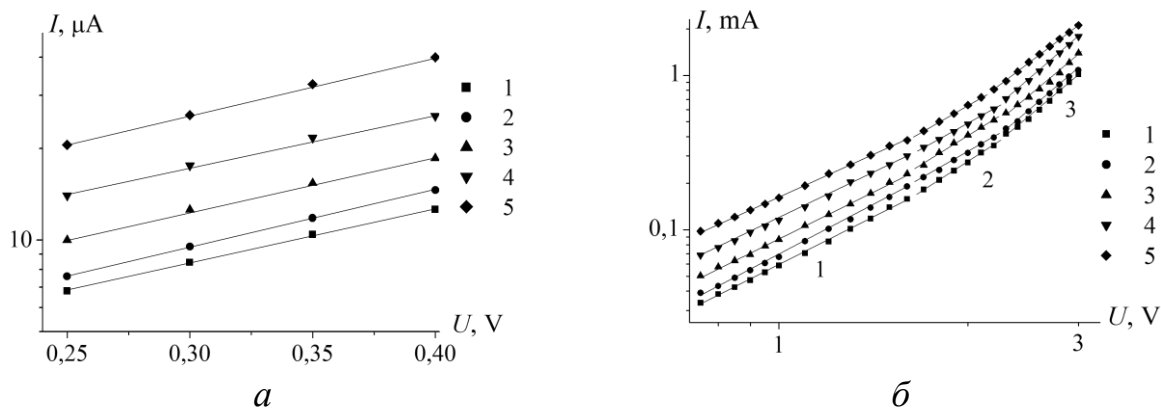
²¹ С.З.Зайнобидинов, А.С.Саидов, А.Ю.Лейдерман, М.У.Каланов, А.Ю.Бобоев. Температурные зависимости электрических свойств $p\text{GaAs}-p(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ гетероструктур. ДАН. 2015. Ст. 20-23

2-жадвал.

Турли ҳароратлардаги A , B ва D катталиклар қийматлари.

$t, ^\circ\text{C}$	25	50	75	100	125
B	3,1	3,05	3,14	3,1	5,38
$A, (\text{В})$	2,65	2,67	2,69	2,74	2,63
$D, (\text{В} \cdot \text{м} \cdot \text{А}^{-1/2})$	13,25	15,9	21,67	23,97	22,7
$B, (\text{В} \cdot \text{А}^{1/2} \cdot \text{м}^{-1})$	13,07	15,7	21,5	23,8	22,5

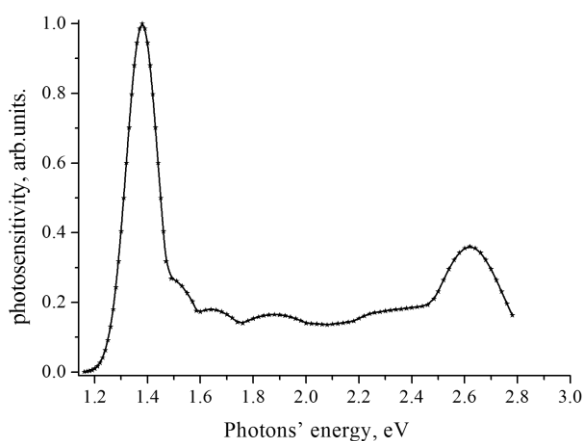
2-жадвалдан V катталигини аниқлайдиган ва ионлашган атомлар концентрациясига, яъни N_R рекомбинацион марказлар концентрацияси, ток ташувчилар ҳаракатчанлиги ва қатламлараро ўтувчи база қалинлигига боғлиқ бўлган A , B ва D катталиклар 25-100 $^\circ\text{C}$ ҳароратлар оралиғида текис ортади ва 125 $^\circ\text{C}$ да камаяди. Бундай қонуният ички комплекслар алмашинуви вақтини бу жараёнларга сезиларли таъсири билан боғлиқ бўлиши мумкинлигини кўрсатади.



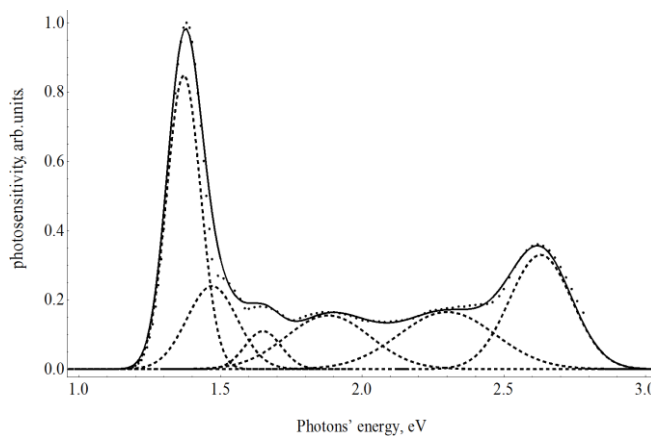
4-расм. n -(GaAs)- p -GaAs $_{0.69}$ (Ge $_2$) $_{0.17}$ (ZnSe) $_{0.14}$ гетеротузилмаларининг турли ҳароратларда яримлогарифмик (a) ва логарифмик (b) масштабидаги вольт-ампер тавсифи, : 1–25, 2–50, 3–75, 4–100, 5–125 $^\circ\text{C}$.

Бу соҳадан кейин 2.2 В дан 3 В гача кучланишларда вольтампер тавсифининг $J = A_1 V^3$ кўринишидаги, яъни Ламперт қонунига бўйсинувчи, дрейф оқимининг диэлектрик релаксацияси деб номланувчи соҳаси кузатилади.

5-а расмда хона ҳароратида n -GaAs- p -(GaAs) $_{0.69}$ (Ge $_2$) $_{0.17}$ (ZnSe) $_{0.14}$ гетеротузилмасининг фотосезгирлигининг спектрал боғланиши тақдим этилган. 5-а расмда спектрал фотосезгирлик 1.16 эВ дан бошланаётганлигини, максимал фотосезгирликни 1.38 эВда кузатиётганлигини кўриш мумкин. n -GaAs- p -(GaAs) $_{0.69}$ (Ge $_2$) $_{0.17}$ (ZnSe) $_{0.14}$ тузилмаларнинг фотосезгирлиги 1.38 эВ энергияли фотонларидан бошлаб, қисқа тўлқинли нурланиш спектри соҳасида монотон равишда текис тушиши кузатилган. Яна 1.37, 1.47, 1.65, 1.88, 2.3 и 2.62 эВ энергияли фотонларда максимумлар кузатилган.



a



б

5-расм. $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ гетеротузилмасининг спектрал фотосезгирлиги: эксперимент натижалари (*a*) ва гаусс яқинлашуви (*б*). Нуқталар-экспериментал натижалар; улуксиз эгри чизик –умумий гаусс чизиғи; пунктир эгри чизиклар-гаусс ташкил этувчилари.

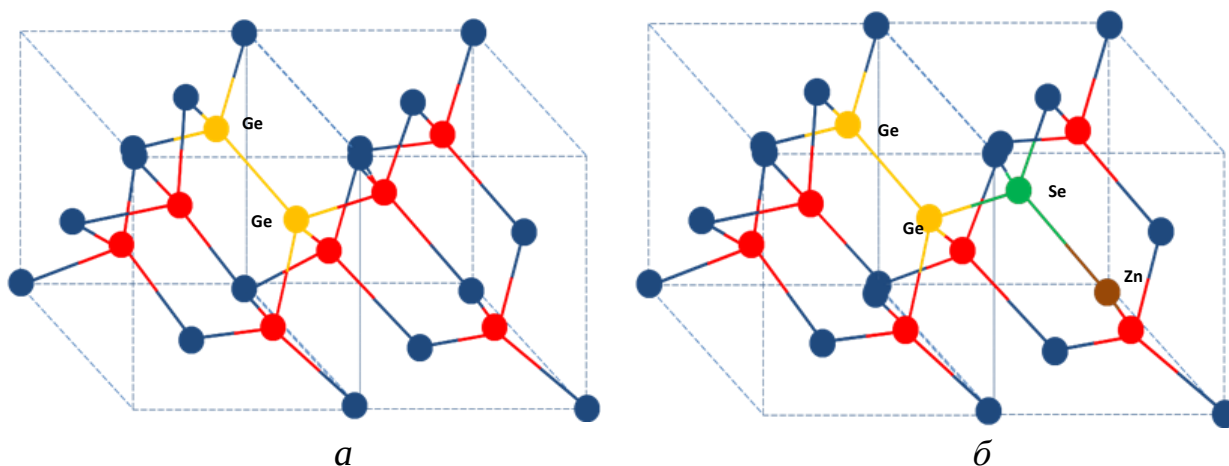
Бундан ташқари, гетеротузилмаларнинг фотосезгирлиги тадқиқоти турли интенсивликдаги ютилиш энергияси яқин бўлган кўпгина фотоаксланишлар ён томонлама устма-уст тушганини кўрсатади.

Гетеротузилманинг фотосезгирлиги энергия ютилиш механизмларини чуқурроқ текшириш мақсадида экспериментал натижаларга умумий гаусс чизиғини яқинлаштириш натижасида юзага келадиган гаусс ташкил этувчиларига ажратиш учун Wolfram Mathematic 7 дастуридан фойдаланилди. Экспериментал эгри чизикқа ютилиш максимумини ҳисобга олиб, алоҳида фоточўққини бошланғич энергия қиймати E_i берилади. Натижада экспериментал ва гаусс эгри чизигига яқинлашуви йиғиндисига энг яхши устма-уст тушишига тўғри келадиган E_i қийматли олтига гаусс чизиғи йиғиндисини ифодалаш мумкин бўлган тахлилий спектр юзага келади. Бу ҳолатда фоточўққи E_i сочилиш қиймати жадвалдаги билан таққосланганда, 0.03 эВ дан ортмаслиги аниқланди. Олтига фоточўққига мос келувчи гаусс эгри чизиклари $E_{ph,1} - 1,076 \div 1,61$ эВ, $E_{ph,2} - 1,16 \div 1,75$ эВ, $E_{ph,3} - 1,45 \div 1,84$ эВ, $E_{ph,4} - 1,48 \div 2,35$ эВ, $E_{ph,5} - 1,85 \div 2,78$ и $E_{ph,6} - 2,77 \div 3$ эВ энергияли фотонлар оралиғида ва уларнинг максимумлари мос равишда 1,37, 1,47, 1,65, 1,88, 2.3 и 2.62 эВ энергияларда кузатилди (5-б расм).

6-а ва б расмда GaAs асосида Ge ва ZnSe киришма атомларилари ўзаро ўрин аламлиниб жойлаштириш натижасида шаклланган нанокластернинг тетраэдрик боғланишлар фазовий конфигурацияси тақдим этилган²². 6-а расмдан $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)$ каттик қоришмадаги нанокристаллар 3 As-Ge, 1 Ge-Ge ва 3 Ga-Ge боғланишлар, 8 та Ga, Ge ва As атомлардан иборат экан. Шундай қилиб, олмоғсимон тузилмалый материалнинг элементар катаги 8 та атомдан ташкил топиб, нанокластернинг чизикли ўлчами 5,6 Å, яъни деярли GaAs

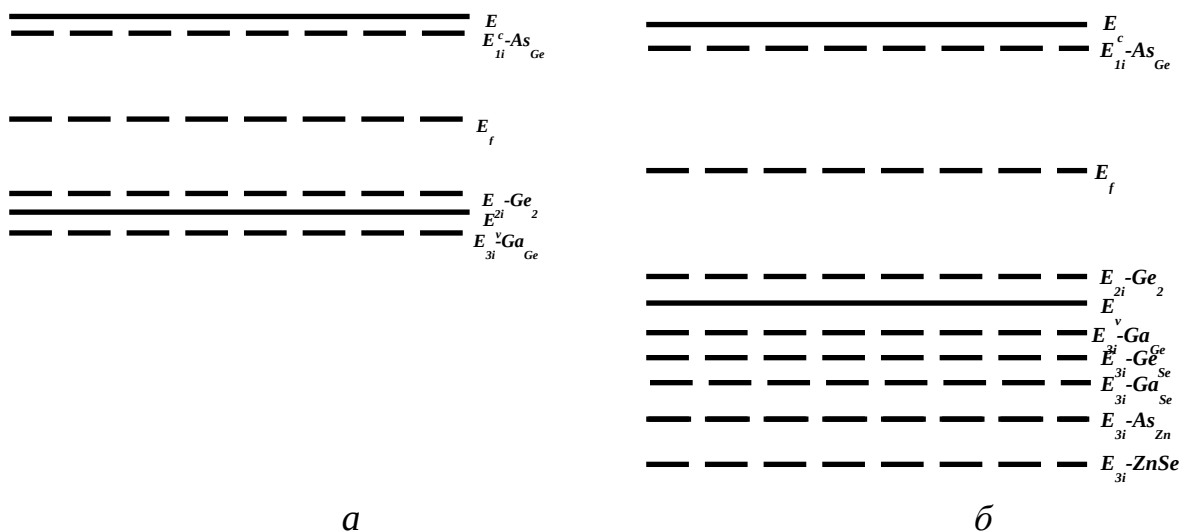
²²Саидов, М.С. Твердые растворы многокомпонентных полупроводниковых соединений с нано-дефектами и примесные вольтаические эффекты в фотоэлементах. Гелиотехника. 2006. No. 4. ст. 48–54.

панжара қийматини қабул қилади. $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)(\text{ZnSe})_y$ қаттиқ қоришмасидаги нано-кластерлар эса GaAs, ZnSe ва Ge_2 молекуларида шаклланиб, 14 атом жойлашади ва 2 As-Ge, 1 Ge-Ge, 3 Ga-Ge, 1 Ge-Se, 3 As-Zn, 1 Zn-Se и 2 Ga-Se боғланишлар (6-б расм), яъни As ва Ga атомлари Zn ва Se атомлари билан ўрин алмашинади ва шунинг учун нанокластернинг чизиқли ўлчами 5,6; 5,6; 10 Å га ортади.



6-расм. $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ (a) и $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ (б) узлуксиз қаттиқ қоришмалари молекулаларининг тетраэдрик фазовий конфигурацияси.

Бизнингча, Ge_2 молекулалари бирикмасининг ман этилган соҳа кенглиги GaAs ман этилган соҳасига қараганда кичик бўлади, шунингдек, улар ман этилган соҳа изовалент киришмеси ҳисобланади ва уларнинг GaAs ман этилган соҳаси оралиғида жойлашади (7-а расм)²³.



7-расм. $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ (a) и $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ (б) қаттиқ қоришмаларида нанокластерларнинг энергетик сатҳларини жойлашиши ва сони.

²³Случанская, И.А. Основы материаловедения и технологии полупроводников. – М.: Мир, 2002. – С. 380.

$(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ қаттиқ қоришмаси асосий панжарасининг нуқсонга мойил соҳалари сиртидаги ZnSe нанокластерлари эса GaAs ва Ge_2 билан атомлараро боғланишлар ҳосил қилиб, GaAs да тўртта энергетик соҳаларни ташкил қилади (7-б расм). Лекин ZnSe ман этилган соҳаси ва унинг комплекс киришмалари GaAs ман этилган соҳасидан катта ва шунинг учун уларнинг сатҳлари валент соҳада жойлашади ва улар валент соҳа изовалент киришмалари ҳисобланади. Шундай қилиб, руҳ селен молекулалари ва германий селен бирикмалари GaAs валент соҳасида учта акцептор сатҳларини беради, бундан ташқари ZnSe панжара қиймати асосий панжара қийматидан қисман катта, шунинг учун панжарада ZnSe ўрнашган жойларда микро кучланишлар юзага келади. Бундай жойлар юқори потенциалга эга бўлади ва бу ZnSe нанокристаллини шаклланишига имкон беради.

ХУЛОСА

$n\text{-(GaAs)-}p\text{-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ гетеротузилмасининг тузилмавий хусусиятлари, электрофизик ва фотоэлектрик хоссалари бўйича ўтказилган тадқиқотлар асосида қуйидаги хулосалар қилинди:

1. $n\text{-GaAs}$ монокристалл тагликларига суюқ фазали эпитаксия усули-да p -типли $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ эпитаксиал қатламлар илк маротаба ўстирилди.

2. Ўстирилган $(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ эпитаксиал қатламлар (100) кристаллографик тартибли блок ўлчамлари 52 нанометрли сфалерит тузилишга эга монокристаллиги аниқланди.

3. Ge_2 молекулалари GaAs молекулалари билан қисман ўрин алмашган ҳолда жойлашиб, асосий панжара блокларини шакллантириши ва блокларнинг бўлиниш чегараси бўйлаб нуқсонга мойил соҳаларида ортиқча Ge атомлари ўлчами 44 нанометрли бўлган нанокристалларни шакллантириши аниқланди.

4. $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ эпитаксиал қатламининг сиртида 59 нанометрли ZnSe нанооролчалар шаклланганлиги ва уларнинг ёнбош ўлчами 55-65 нанометрли *dome* оролча геометрик шаклга эга эканлиги аниқланди.

5. $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ қаттиқ қоришмаси кристалл панжарасида GaAs атомлари билан ковалент боғланган сиртий соҳаларда Ge нанокристаллари ва ZnSe квант нуқталари жойлашиши илк маротаба аниқланди.

6. $n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ гетеротузилмасининг вольт-ампер тавсифининг тўғри ўтиш йўналишида токнинг кучланишга боғлиқлиги $J \sim V^\alpha$ билан ифодаланади, $\alpha=2 \div 3$ қийматларни қабул қилди. Бунга сабаб бўлган Ge ва ZnSe нанокристаллари ҳосил қилаётган марказлар ёки комплекслар билан маҳаллий марказларнинг бир вақтда иштирок этиши тадқиқ этилди.

7. $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ қатламда Ge ва ZnSe нанокристаллари молекулярининг ионланиш энергиялари қийматлари фарқи туфайли $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{ZnSe})_x(\text{Ge}_2)_y$ эпитаксиал қатламининг танловчи фотосезгирликка эга эканлиги аниқланди. Шунингдек, бундай эпитаксиал қатламлар асосида тайёрланган гетеротузилмалардан нурланиш спектрининг кўринувчи ва инфрақизил соҳаларида ишловчи ёруғлик қабулқилгич учун фотофаол материал сифатида фойдаланиш мумкинлиги исботланди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.30.08.2018.FM/T.01.12 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ
ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ
ПРИ НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА**

АНДИЖАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

БОБОЕВ АКРАМЖОН ЙУЛДАШБОЕВИЧ

**СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ, ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУР
 $n\text{-(GaAs)}\text{-}p\text{-(GaAs)}_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(ZnSe)}_y$**

01.04.10-Физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент-2019

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2019.2.PhD/FM69

Диссертация выполнена в Андижанском государственном университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (ispm.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель: **Йулчиев Шахриёр Хусанович**
кандидат физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Дадамирзаев Мухаммаджон Гуломкодиорович**
доктор физико-математических наук, доцент

Тургунов Нозимжон Абдуманнопович
доктор физико-математических наук

Ведущая организация: Ферганский государственный университет.

Защита диссертации состоится «__» _____ 2019 года в ____ часов на заседании Научного совета по присуждению ученой степени доктора философии PhD.30.08.2018. FM/T.01.12 при Научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета (Адрес: 100057, Узбекистан, г.Тошкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел.: (998 71) 248-76-94; Факс: (998 71) 248-79-92; e-mail: info@ispm.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Отделе внедрения информационных технологий института (зарегистрирована за № __) по адресу: 100057, Узбекистан, г. Тошкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел.: (998 71) 248-79-59; e-mail: info@ispm.uz.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2019 года.
(реестр протокола рассылки № _____ от «__» _____ 2019 г.).

Ш.Б. Утамурадова
председатель Научного совета по присуждению
ученой степени доктора философии,
д.ф.-м.н., профессор

С.С. Насриддинов
Ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученой степени
доктора философии, д.т.н., доцент

А.Т. Мамадалимов
Председатель научного семинара при Научном
совете по присуждению ученой степени доктора
философии, д.ф.-м.н., профессор, академик

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. Известно, что в настоящее время полупроводниковые многослойные гетероструктуры на основе GaAs благодаря своим оптимальным теплофизическим характеристикам, высокой подвижности электронов, достаточно большой ширине запрещенной зоны, а также особенностям зонной структуры, обуславливающим возможность прямых межзонных переходов носителей заряда, являются одним из основных элементов современной электронной техники. На его основе получен ряд уникальных электронных изделий, однако интенсивное развитие полупроводниковой микроэлектроники, появление новых направлений, таких как нанотехнологии, наноматериалы и нанoeлектроника требуют расширения функциональных возможностей электронных изделий массового производства, поиска новых материалов, а также разработки технологий получения двух- и многокомпонентных твердых растворов с улучшенными физическими свойствами.

В настоящее время в ведущих научных центрах мира ученые и специалисты уделяют большое внимание изучению проблемы разработки новых электронных изделий, расширению функциональных возможностей наиболее широко используемых полупроводниковых материалов и многослойных структур на их основе. В частности, разрабатываемые в Институте полупроводниковой технологии (Штутгартский Университет, Германия) и в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе (Российской Федерации) технологии получения многослойных полупроводниковых структур и способов управления диапазоном их фоточувствительности, выявлению механизмов физических процессов на границах раздела различных слоев в зависимости от технологии получения и типа базового полупроводника является значительным.

В соответствии со стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан обращается особое внимание развитию научных исследований и инновационной деятельности ученых, по вопросам создания эффективных механизмов внедрения в практику достижений науки и инновации, в том числе интенсивному развитию полупроводниковой оптоэлектроники и нанотехнологии, а также создания многослойных гетероструктур с квантово-размерными элементами. Такой технологический прогресс требует разработки современных методов эпитаксии (газофазной, молекулярно-лучевой, жидкофазной и др.) а также, создания наноразмерных структур.

В «Год активных инвестиций и социального развития» поднятие на современный уровень качества получаемых научных результатов достойно особого внимания. В частности, разработка технологических условий получения многослойных гетероструктур с нанобъектами, исследование их физических параметров и внедрение их в производство микро- и оптоэлектронных изделий является **актуальной** задачей современного этапа развития физики и техники полупроводников.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнением задач, приведенных в Указе Президента Республики Узбекистан ПФ-4947 от 7 февраля 2017 года «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», Постановлении Президента Республики Узбекистан ПК-№2772 от 13 февраля 2017 года «О приоритетных направлениях развития электронной промышленности 2017-2021 годах» и №ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также других нормативно-правовых документов, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Диссертация выполнена в рамках приоритетных направлений развития науки и технологий Республики Узбекистан III. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. До настоящего времени ученые и производители оптоэлектронных приборов обращали недостаточное внимание на технологию выращивания и исследование твердых растворов, изучению электронных процессов, происходящих в гетероструктурах и разработке способов оптимизации их фотоэлектрических параметров. Одними из таких гетероструктур являются структуры $p\text{-GaAs-}n\text{-(GaAs)}_{1-x}\text{-(Ge}_2\text{)}_x\text{(ZnSe)}_y$ фоточувствительности, которых позволяет использовать их как новый класс селективного фотоприемника, работающего в ближней инфракрасной и видимой областях спектра излучения.

Следует отметить, что за последние 20 лет проведены широкомасштабные исследования Ж.И. Алферовым (Россия) со своими сотрудниками методом молекулярно-лучевой эпитаксии на основе соединений GaAs получены квантовые точки элементов InGaAs, InAs и GaSb и показали возможность создание на их основе и инжекционных лазеров¹. Японскими учеными под руководством Бинг Ли Гу², российскими учёными (В.М. Андреев³, М.М. Гадзалиев⁴ и Р.С. Вартанян⁵) на основе GaAs выращены эпитаксиальные пленки $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ и изучены их кристаллические и зонные строения, электрофизические и оптические

¹Леденцов Н.Н., Устинов В.М., Щукин В.А., Копьев П.С., Алферов Ж.И., Бимберг Д. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры. Физика и техника полупроводников, 1998, том 32, № 4, стр.385-410.

²Bing-Lin Gu, Jun Ni, and Jia-Lin Zhu Structure of the alloy $(\text{GaAs})_{1-x}\text{Ge}_2x$ and its electronic properties, Phys. Rev. B, 1992. Vol. 45, Issue 8, pp. 4071.

³V.M. Andreev, V.P. Khvostikov, N.A. Kalyuzhnyi, S.S. Titkov, O.A. Khvostikova, M. Z. Shvarts. GaAs/Ge heterostructure photovoltaic cells fabricated by a combination of MOCVD and zinc diffusion techniques. Semiconductors, 2004, Vol. 38, Issue 3, pp 355–359.

⁴М.М. Gadzhialiev, Z.Sh. Pirmagomedov, T.N. Éfendieva, The effect of a thermoelectric field on a current-voltage characteristic of the $p\text{-Ge-}n\text{-GaAs}$ heterojunction. Semiconductors. 2004, Vol. 38, Issue 11, pp 1302–1303.

⁵Вартанян Р.С. Электрофизические, оптические и люминесцентные свойства метастабильных твердых растворов $(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs})_{1-x}$ и гетеропереходы на их основе. Дисс. канд.физ.-мат.наук. Ленинград: ФТИ, 1984, 181 с.

свойства. Ведущим ученым мира М. Фунато (Япония)⁶, Х. Фаррел и Р. Лавиолет (Испания)⁷ удалось получить гетероструктуры типа GaAs/ZnSe и изучить их структуру и пространственную конфигурацию². Китайскими учеными под руководством Янг Бинг Йи изучены условия оптимизации параметров солнечных элементов на основе гетероструктур GaAs/InAs-GaAs/ZnSe с квантовыми точками⁸.

Узбекскими учеными под руководством М.С. Саидова на основе GaAs получены диодные структуры типа $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ и $(\text{Ge}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ ⁹ и $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ ¹⁰. А.В. Каримовым и его¹¹ учениками созданы фотодиодные структуры AlGaAs/GaAs аснове GaAs.

В свою очередь, следует обратить внимание, что получение многокомпонентных гетероструктур с заданными параметрами и исследование их физических свойств представляют большой интерес. С развитием технологий и создания высокочувствительных измерительных приборов появляются все новые сведения о свойствах и возможностях рассматриваемых структур. Несмотря на всё это еще остается невыясненным ряд структурных особенностей и отдельных электрофизических, фотоэлектрических свойств гетероструктур на основе $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$, а также, практически отсутствуют исследования, посвященные влиянию интервала температуры выращивания, скорости охлаждения и технологических режимов на формирование квантовых нанобъектов, их плотностей, форм и размеров.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках проектов научных исследований Андижанского Машиностроительского института по темам: Ф-2-001 «Транспорт носителей заряда и фоточувствительность в полупроводниковом твердом растворе GaAs/Ge/ZnSe при радиационном воздействии» (2016 г.) и Андижанского государственного университета ОТ-Ф2-68 «Механизмы образования примесно-дефектных микро-и нанобъединений в кристаллах и их роль в создания многослойных структур с широкими функциональными возможностями» (2017-2020 гг.);

Целью исследования является исследование структурных особенностей, электрофизических и фотоэлектрических свойств гетероструктур $n\text{-(GaAs)}\text{-}p\text{-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$.

⁶М. Funato, "Title control of interface properties in ZnSe-GaAs heterovalent heterostructures grown by metalorganic vapor phase epitaxy," Dissertation, Kyoto University, Kyoto, Japan, 2000. P. 157.

⁷H.H. Farrell and R. A. LaViolette, "Cation variations at semiconductor interfaces: ZnSe(001)/GaAs(001) superlattices," Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2004. Vol. 22, Issue. 4, pp. 2250-2256.

⁸Jiang Bing-Yi, Zheng Jian-Bang, Wang Chun-Feng, Hao Juan, Cao Chong-De Optimization of quantum dot solar cells based on structures of GaAs/InAs-GaAs/ZnSe. Acta Phys. Sin. 2012, Vol. 61, Issue. 13. pp. 1-6.

⁹А.С. Саидов, Э.А. Кошчанов, А.Ш. Раззаков. О возможности улучшения структурного совершенства новых гетеропар GaAs-(Ge₂)_{1-x}(ZnSe)_x, Ge-(Ge₂)_{1-x}(ZnSe)_x, GaP-(Ge₂)_{1-x}(ZnSe)_x, Si-(Ge₂)_{1-x}(ZnSe)_x. Письма в ЖТФ, 1998, том 24, № 2 ст 12-16.

¹⁰Saidov A.S. et.al. Growth of $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ solid solution films and investigation of their structural and some photoelectric properties. Physics of the Solid State, 2011, Vol. 53, Issue. 10, pp. 2012-2021.

¹¹А.В. Каримов, Д.М. Ёдгорова, Некоторые особенности получения фототока в одно- и многобарьерных фотодиодных структурах Физика и техника полупроводников, 2010, Том 44, Вып. 5. стр. 674-679.

Задачи исследования:

выявление оптимальных условий выращивания эпитаксиального твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ из оловянного раствора-расплава и исследование их электрических свойств;

исследование структурных особенностей выращенных пленочных твердых растворов $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$;

исследование механизмов образования и свойств нанокристаллов Ge и ZnSe на поверхности буферного слоя $\text{GaAs}_{1-x}\text{Ge}_{2x}$;

исследования поверхностных состояний выращенной эпитаксиальной пленки $(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ и определение геометрической формы распределения и плотности наноостровков ZnSe;

исследование электрофизических и фотоэлектрических свойств многослойных гетероструктур $n\text{-GaAs-}p(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$.

Объектом исследования являются твердые растворы $(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ и p - n переходы на их основе.

Предмет исследования. Выявление структурных совершенств, определение фундаментальных параметров твердых растворов $p\text{-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ и выявление закономерностей механизмов прохождения тока в $n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ гетероструктурах и формирования их спектральной чувствительности.

Методы исследований. В работе использованы апробированные методы получения многослойных гетероструктур $n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ методом жидкофазной эпитаксии, структурные исследования методами рентгенодифрактометрии, морфологические исследования с помощью атомно-силового микроскопа, измерения вольтамперных характеристик с комплексом измерительных приборов и спектральных характеристик методом поглощения оптического излучения, стандартные четырехзондовые методы измерения удельного сопротивления,

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые выращены монокристаллические твердые растворы $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ ($0 \leq x \leq 0.17$, $0 \leq x \leq 0.14$) p -типа проводимости на монокристаллических $n\text{-GaAs}$ -подложках с ориентацией (100) методом жидкофазной эпитаксии из оловянного раствора-расплава;

установлено, что выращенные эпитаксиальные слои твердого раствора $(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ имеют сфалеритную структуру и являются монокристаллическими, с размерами блоков 52 нм и с ориентацией (100), соответствующей ориентации подложки;

выявлено, что молекулы Ge_2 частично заменяют молекулы GaAs в дефектных областях матричной решетки на границах и приграничных областях раздела с последующей сегрегацией ионов германия с образованием нанокристаллов;

впервые обнаружено, что наноостровки селенида цинка размерами 59 нм образуются в приповерхностной области твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$;

обнаружено, что плотность, форма и размеры квантовых нанобъектов зависят от технологического режима (интервала температуры выращивания и скорости охлаждения);

установлено, что прямая ветвь вольтамперных характеристик $J \sim V^a$ гетероструктур $n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{0.69}\text{(Ge}_2\text{)}_{0.17}\text{(ZnSe)}_{0.14}$ в прямом направлении тока состоят из нескольких участков, отличающиеся углами наклона и они обусловлены образованием нанокристаллов Ge и ZnSe;

обнаружено, что твердый раствор $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{ZnSe})_x(\text{Ge}_2)_y$ обладает избирательной фоточувствительностью, обусловленной нанокристаллитами Ge и ZnSe в слое $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ с отличающимися значениями энергии ионизации соответствующих молекул.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

полученные нами новые полупроводниковые материалы гетероструктуры $n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{0.69}\text{(Ge}_2\text{)}_{0.17}\text{(ZnSe)}_{0.14}$ могут быть использованы как фотоактивный элемент для селективного фотоприемника, работающего в ближней инфракрасной и видимой области спектра излучения.

Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием хорошо апробированных экспериментальных и комплексных независимых методов: хорошей воспроизводимостью результатов; непротиворечивостью выводов об общих физических представлениях и подобных явлениях; сопоставлением их с общезначимыми закономерностями и визуальным наблюдением.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследований заключается в том, что они расширяют представления о механизмах явлений, происходящих в многокомпонентных гетероструктурах. Это является физической основой для создания селективного фотоприемника на основе фотоактивных материалов, работающего в ближней инфракрасной и видимой областях спектра излучения. Это представляет теоретический и практический интерес для полупроводникового материаловедения и электронного приборостроения.

Внедрение результатов исследования.

Способ определения геометрических форм и размеров нанобъектов ZnSe и выявления их механизмов образования, а также характеристик токопрохождения нанокристаллов ZnSe применен в проекте Каракалпакского государственного университета № Ф-2-37 (2012-2016 г.г.) на тему «Особенности нелинейных лазерно-индуцированных процессов в полупроводниках» (Справка Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан за № 89-03-2001 от 24 мая 2018 г.);

Способ определения влияния технологического режима (интервала температуры выращивания, скорости охлаждения) на формирование квантовых нанобъектов, их плотностей, форм и размеров применен при выполнении гранта Института ядерной физики № Ф2-ФА-Ф120 (2012-2016 г.г.) на тему «Электронные свойства и радиационная модификация низкоразмерных

высокотемпературных сверхпроводников, полупроводниковых гетероструктур, металлов и их оксидов». (Справка Академии Наук Республики Узбекистан за № 41-14-0023 от 17 июня 2019 г.).

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 4 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов. По теме диссертации опубликовано 8 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Кабинете Министров Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ. Опубликованные материалы полностью отражают основное содержание диссертации.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и она изложена на 121 страницах, включая 13 рисунков, 5 таблиц, содержит 100 библиографических ссылок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, приведен обзор международных научных исследований по теме диссертации, степень изученности проблемы, сформулированы цели и задачи, выявлены объекты. Описаны предметы и методы исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе «Современное состояние выращивания эпитаксиальных слоев $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ » анализируется состояние проблемы и тенденции по исследованию современного состояния выращивания эпитаксиальных слоев $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{ZnSe})_x(\text{Ge}_2)_y$. На основе анализа имеющихся теоретических и экспериментальных данных сформулирована постановка задачи.

Во второй главе «Экспериментальные методы исследования» исследованы термодинамические условия образования непрерывных твердых растворов замещения $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ и даны характеристики приборов и установок, которые использовались в процессе работы.

Эпитаксиальные слои твердых растворов $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ выращивались методом жидкофазной эпитаксии из ограниченного объема оловянного раствора - расплава в кварцевом реакторе вертикального типа с горизонтально расположенными подложками. Подложками служили GaAs шайбы диаметром 20 мм и толщиной ~ 350 мкм, вырезанные из монокристаллического арсенида галлия *n*-типа проводимости с кристаллографической ориентацией (100) и удельным сопротивлением 250 Ом·см. Состав раствора-расплава был получен на основе предварительных исследований системы Sn-

GaAs-Ge-ZnSe. Эпитаксиальные слои с наилучшими параметрами получались при интервале температуры кристаллизации 730 - 640°C и скорости охлаждения подложки - 1,5 град/мин. Выращенные пленки имели дырочный тип проводимости с удельным сопротивлением $\sim 0,1$ Ом·см и толщину 10 мкм¹².

Для исследования физических свойств изготовленных гетероструктур n -GaAs- p -(GaAs)_{1-x-y}(Ge₂)_x(ZnSe)_y, нами были использованы стандартные измерительные приборы и установки: дифрактометр (ДРОН-3М); сканирующий зондовый микроскоп (Solver Next); монохроматор (CARL ZEIS JENA) с кварцевой оптикой и другие электрические измерительные приборы.

В третьей главе «Рентгено-дифракционные и электронно-микроскопические исследования твёрдого раствора (GaAs)_{1-x-y}(Ge₂)_x(ZnSe)_y на основе подложек GaAs» представлены результаты исследований структуры подложки GaAs и выращенные эпитаксиальные слои (GaAs)_{0.69}(Ge₂)_{0.17}(ZnSe)_{0.14}, а также электронно-микроскопические исследования таких твердых растворов

На рис. 1, а представлена рентгенограмма подложки GaAs. Видно, что на дифракционной картине присутствуют несколько селективных структурных рефлексов с различной по величине интенсивностью. Анализ показал, что поверхность подложки соответствует кристаллографической плоскости (100). Об этом свидетельствует присутствие на рентгенограмме серии селективных рефлексов типа {H00} с большой интенсивностью; структурные линии (200)_{GaAs}, (400)_{GaAs} и (600)_{GaAs}. Экспериментально определенная величина параметра решетки подложки $a_{\text{GaAs}} = 5,6532$ Å, которая очень близка к её табличному значению $\sim a_{\text{GaAs}} = 5,646$ Å¹³.

На рис. 1, б. представлена рентгенограмма эпитаксиальной пленки твердого раствора (GaAs)_{0.69}(Ge₂)_{0.17}(ZnSe)_{0.14}. Она существенно отличается от рентгенограммы подложки и в ней наблюдаются появление новых структурных линий и уровень неупругого фона имеет немонотонный характер, а также увеличение интенсивности рефлексов (200), (400) и (600) соответственно. Это обусловило частичное замещение некоторых молекул арсенида галлия на парные атомы Ge в дефектоспособных областях арсенида галлиевой решетки пленки. Об этом свидетельствует значение параметра решетки пленки $a_f = 5,6568$ Å, определенное по трем рефлексам - (200), (400) и (600), значение которого несколько больше, чем параметр решетки подложки- $a_s = 5,6532$ Å. Это позволяет, предположить, что базовая решетка исследуемого твердого раствора состоит из двойного GaAs и Ge, то есть GaAs_{1-x}Ge_x. Этот вывод подтверждается уровнем неупругого фона рентгенограмма пленки, и она на 22 % выше, чем уровень фона подложки. Это свидетельствует о локальном характере сосредоточения механических напряжений, связанных с неоднородным распределением атомов германия в

¹²С.З. Зайнабидинов, Ш.Х. Йулчиев, А.Й.Бобоев, Х.А. Махмудов, М Кучкарова. Особенности выращивания эпитаксиального слоя твердого раствора (GaAs)_{1-x-y}(Ge₂)_x(ZnSe)_y. Научный вестник АндГУ, 2019, № 1. ст. 5-8.

¹³ Краткий справочник физико-химических величин. Под ред. А. А. Равделя и А. М. Пономаревой. Л.: Химия, 1983. С.138.

решетке пленки и подтверждается присутствием на рентгенограмме двух дифракционных отражений от плоскости (220) и (440) нанокристаллов Ge с другой ориентацией (рис. 2, *a*), нежели ориентации подложки.

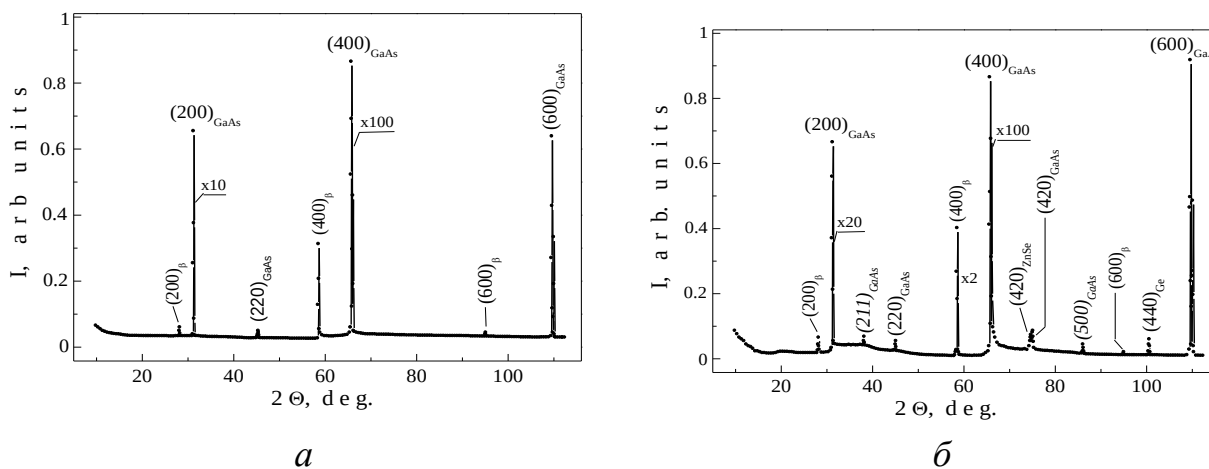


Рис.1. Рентгенограмма GaAs подложки (а) и (GaAs)_{0.69}(Ge)_{0.17}(ZnSe)_{0.14} эпитаксиальной пленки (б)

Из рис. 2, *a* видно, что этот структурный рефлекс имеет триплетную форму, образованную из двух структурных линий, частично перекрывающихся по α_1 и α_2 излучениям от одинаково ориентированных нанокристаллитов Ge и ZnSe. Анализы показывают, что примеси Ge в решетке GaAs распределены неравномерно и в дефектоспособных областях матричной решетки этой примеси самообразуются нанокристаллы Ge с размерами 44 нм. Значение параметра решетки нанокристаллов Ge, определенное из рентгенограммы, составило $a_{\text{Ge}} = 5,6625 \text{ \AA}$, что также близко к табличным значениям $a_{\text{Ge}} = 5,6576 \text{ \AA}$. На рентгенограмме пленки наблюдаются еще два структурных рефлекса с существенной интенсивностью. Анализ показал, что они вызваны нанокристаллитами селенида цинка (ZnSe); (220) и (420) (рис. 1, *б*). Несмотря на различие в направлении роста, этим нанокристаллитам характерны почти одинаковые размеры, равные ~ 59 нм.

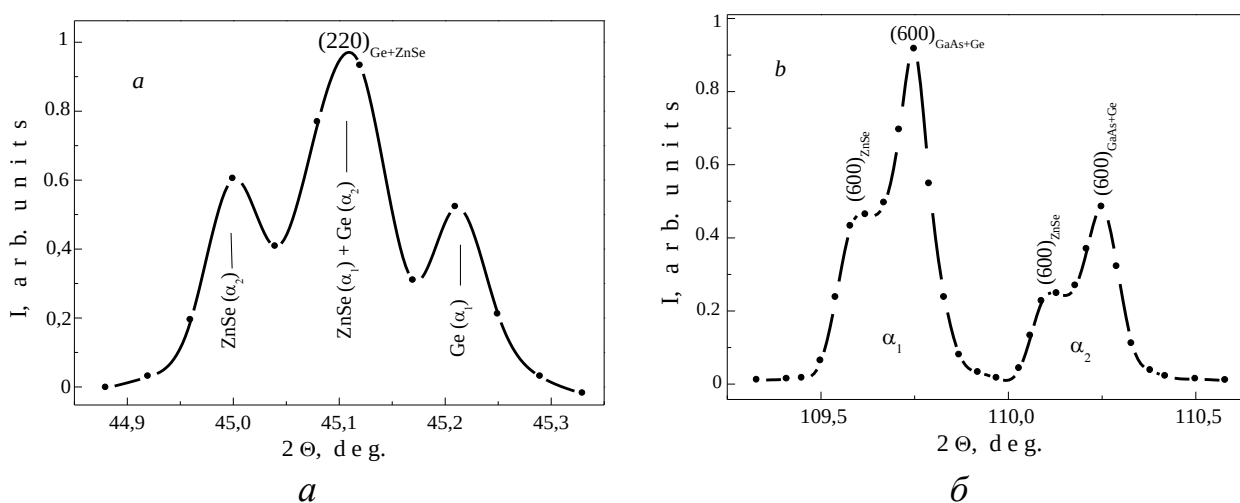


Рис. 2. Форма дифракционного отражения (220) (а) и (600) (б) эпитаксиальной пленки (GaAs)_{1-x-y}(Ge)₂(ZnSe)_y.

Этот факт позволяет предположить, что нанокристаллиты селенида цинка растут на поверхности твердого раствора $\text{GaAs}_{1-x}\text{Ge}_x$ в форме островков - квантовых точек, свидетельством, которого служит форма дифракционного отражения (600) (рис.2, б). Видно, что удовлетворительно разрешается дифракционное отражение (600) по α_1 и α_2 компонентам излучения для решетки $\text{GaAs}_{1-x}\text{Ge}_x$ и ZnSe , соответственно. Экспериментально определенные значения параметра решетки селенида цинка и арсенида галлия составляло $a_{\text{ZnSe}} = 5,6697 \text{ \AA}$ и $a_{\text{GaAsGe}} = 5.6697 \text{ \AA}$, что близко к табличным значениям $a_{\text{ZnSe}} = 5,661 \text{ \AA}$ и $a_{\text{GaAs}} = 5,646 \text{ \AA}$, соответственно¹⁴.

Исследования трехмерного изображения поверхности выращенной эпитаксиальной пленки $(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ с помощью атомно-силового микроскопа, показано на рис. 3. Из рисунка видно, что во время роста пленки, в приповерхностной области формируются островки с высотой ~ 12 и шириной $\sim 55 \div 65$ нм. Исследования показали, что такие островки формируются из компонентов твердого раствора и являются квантовыми точками. Данные, полученные атомно-силовым микроскопом, показывают, что на этапе роста наноостровки ZnSe в твердом растворе $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ имеют геометрическую форму купола, так называемым *dome*-островков с характерным латеральным размером 50-90 нм с круглым основанием (рис. 3, а)¹⁵.

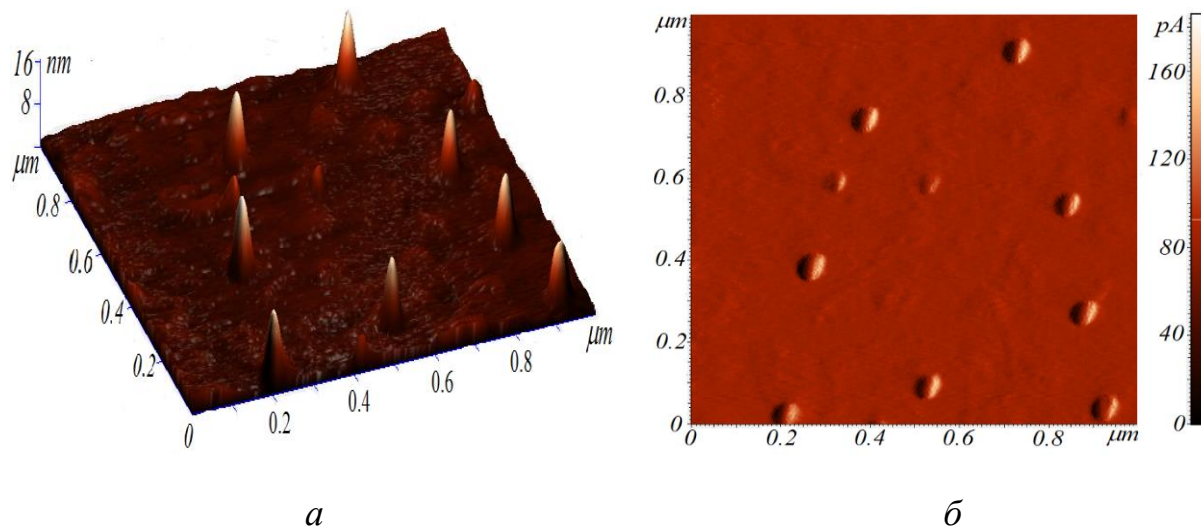


Рис.3. Трехмерное изображение поверхности эпитаксиальной пленки $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ (а) и карта локальной проводимости нанообъектов ZnSe (б).

На рис. 3, б приведены результаты исследований локальной проводимости нанообъектов ZnSe на поверхности твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ полученных методом контактного атомно-силового микроскопа. Измерения

¹⁴Sheng S. Лю. Semiconductor Physical Electronics. - Second Edition. - Springer, 2006. - 708 с.

¹⁵Дубровский В.Г., Теория формирования эпитаксиальных наноструктур. Москва: Физматлит: 2009, С. 486.

локальных значений сопротивления растекания проводились параллельно с данными топографии. Из рисунка видно, что светлым участкам соответствуют большие токи растекания, и они имеют более низкое сопротивление растекания. Согласно полученным данным, наноструктуры ZnSe обладают повышенной проводимостью по сравнению с твердым раствором $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$. Если квантовые точки из наноструктур ZnSe более широкозонные, чем GaAs или Ge, то транспорт носителей через нанобъекты будет облегчен¹⁶.

В процессе роста удается создать достаточно плотный и однородный по свойствам ансамбль квантово-размерных объектов, обладающих по сравнению с матрицей более высокой проводимостью, чем полученным с помощью атомно-силовым микроскопом. Методом жидкофазной эпитаксии удается создать квантовые точки ZnSe на поверхности твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$.

В четвёртой главе «Некоторые электрофизические и фотоэлектрические свойства $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ гетероструктур» приведены темновые вольт-амперные характеристики при различных температурах и спектральные зависимости фоточувствительности изготовленных гетероструктур.

Начальный участок вольтамперных характеристик исследуемых гетероструктур с толщиной пленки 10 мкм от нуля до 0,25 В который представляет собой омический участок, имеет место зависимость $J \sim V$. С ростом приложенного напряжения в диапазоне от 0.25 до 0.4 В наблюдается экспоненциальная зависимость (рис.4 а.) вольтамперной характеристики, независимо от температуры, которая описывается выражением:

$$I \approx I_0 \cdot e^{\frac{qV}{ckT}}. \quad (1)$$

Показатель «с» в экспоненте ВАХ определяется из экспериментальных данных как:

$$c = \frac{q}{kT} \cdot \frac{V_2 - V_1}{\ln \frac{I_2}{I_1}}. \quad (2)$$

Такая экспоненциальная зависимость тока от напряжения была впервые предложена В.И.Стафеевым¹⁷ и затем уточнены А. Лейдерман¹⁸ для р-і-п-структур с показателем «с» в экспоненте, который имеет следующий вид:

¹⁶С.З. Зайнабидинов, А.Й.Бобоев. Морфологические исследования особенностей наноструктур ZnSe на поверхности твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$. ЎзФА маърузалари. 2018. №4, С. 17-21.

¹⁷Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов М.: Радио и связь, 1990. С.264.

¹⁸А.Ю.Лейдерман. Рекомбинацию и релаксационные процессы в полупроводниках с примесными комплексами. В кн: Физика и материаловедение полупроводников с глубокими уровнями. М., Металлургия, 1987, С. 232.

$$c = \frac{2b + ch(W / L_n) + 1}{b + 1} . \quad (3)$$

где b -отношение подвижностей электронов и дырок для твердого раствора, d -толщины базы и L_p -длина диффузии. Из экспоненциальной зависимости ВАХ, нами определены значения I_0 , c и b , при различных температурах, которые приведены в табл.1¹⁹. Как видно из таблицы, при температурах 25-100°C значения I_0 (А) плавно растет, а c и b -почти не меняются. При 125°C наблюдается заметное увеличение их величины. Это видимо связано с непостоянством концентрации центров, влияющих на подвижность носителей тока в диапазоне температур 25-100° С. При температуре 125°C возможно образование различных заряженных центров, рассеивающих носителей тока и изменяющих их подвижность.

Таблица 1.

Значения предэкспоненциального множителя I_0 , показателя экспонента «с» и отношение подвижностей электронов и дырок для гетероструктур $n(\text{GaAs})\text{-}p(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ при различных температурах.

$t, ^\circ\text{C}$	25	50	75	100	125
$I_0, (\text{A})$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$3,63 \cdot 10^{-6}$	$4,43 \cdot 10^{-6}$	$6,73 \cdot 10^{-6}$	$5,54 \cdot 10^{-6}$
C	9,56	9,65	9,55	9,62	10,55
B	3,1	3,05	3,14	3,102	5,38

Как видно из рис.4 б вольтамперные характеристики этих структур при напряжениях $V > 0,5$ В описываются степенной зависимостью типа $J \sim V^\alpha$, где α меняется от 2 до 3 и растет с ростом напряжения.

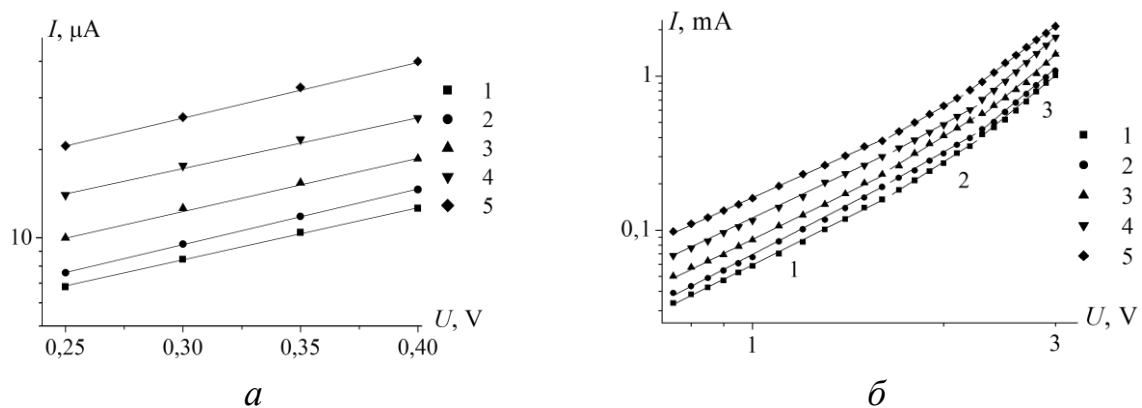


Рис. 4. Темновая вольтамперная характеристика $n(\text{GaAs})\text{-}p(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ структур в полулогарифмических (а) и логарифмических (б) масштабах при различных температурах,: 1-25, 2-50, 3-75, 4-100, 5 –125 °С.

¹⁹Zainabidinov, et. al. Growth, Structure, and Properties of GaAs-Based $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ Epitaxial Films //Semiconductors, 2016, Vol. 50, No. 1, pp. 59–65.

Первый участок $J \sim V^2$ наблюдается в интервале напряжений от 0,5 до 1,7 В и может быть объяснён в рамках представлений о дрейфовом режиме омической релаксации объемного заряда²⁰. С дальнейшим ростом напряжения наблюдается резкий рост тока вида $J \sim V^{2,7}$. По-видимому, здесь начинает играть роль процессы внутрикомплексного электронного обмена, приводящие к «задержке» рекомбинационных процессов. В этом случае вольтамперная характеристика имеет следующее аналитическое выражение.

$$V = \frac{(b+1)d^2 N_R}{N_D \mu_p \tau_i} + \frac{d}{q \mu_p (b+1) C} \sqrt{J} - \frac{2(b+1) N_R d^2 c_n}{N_D \mu_p \alpha \tau_i C} \frac{1}{\sqrt{J}} = A + B \sqrt{J} - \frac{D}{\sqrt{J}} \quad (4)$$

Из этих зависимостей вольтамперной характеристики, нами определены A , B и D параметры, зависящие от концентрации ионизованных атомов глубоких примесей, отношения подвижностей электронов и дырок, толщины базы межслойного перехода. В табл.2, приведены величины параметров A , B и D , в зависимости от температуры²¹.

Как видно из табл.2. параметры A , B и D , определяющие величину V и зависящие от концентрации ионизованных атомов, т.е. концентрации рекомбинационных центров N_R , подвижностей носителей тока и толщины базы межслойного перехода, плавно растут в интервале 25-100°C и заметно влияние на эти процессы времени внутрикомплексного обмена τ_i уменьшаются при 125°C. Такая закономерность, возможно, связана с заметным влиянием на эти процессы времени внутрикомплексного обмена τ_i . За этим участком (рис 4, б.) при напряжениях от 2,2 до 3 В вольтамперные характеристики имеют вид $J = A_1 V^3$, т.е. участок вольтамперной характеристики, подчиняется закону Ламперта, так называемого дрейфовым режимом диэлектрической релаксации объемного заряда.

Таблица 2.
Значения параметров A , B , и D при различных температурах.

$t, ^\circ\text{C}$	25	50	75	100	125
B	3,1	3,05	3,14	3,1	5,38
$A, (\text{В})$	2,65	2,67	2,69	2,74	2,63
$D, (\text{В} \cdot \text{м} \cdot \text{А}^{-1/2})$	13,25	15,9	21,67	23,97	22,7
$B, (\text{В} \cdot \text{А}^{1/2} \cdot \text{м}^{-1})$	13,07	15,7	21,5	23,8	22,5

На рис. 5, а представлена спектральная зависимость фоточувствительности $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ гетероструктуры при комнатной температуре. Из рис. 5 а видно, что спектральная фоточувствительность начинается при энергии фотонов 1.16 эВ, а максимальная фоточувствитель-

²⁰М.Ламперт, П.Марк. Инжекционные токи в твердых телах. М.,Мир. 1973.

²¹С.З.Зайнобидинов, А.С.Саидов, А.Ю.Лейдерман, М.У.Каланов, А.Ю.Бобоев. Температурные зависимости электрических свойств $n\text{GaAs-p(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ гетероструктур. ДАН. 2015. Ст. 20-23

ность наблюдается при энергии фотонов 1,38 эВ. В коротковолновой области спектра излучения, начиная с энергии фотонов 1,38 эВ, наблюдается монотонный, плавный спад фоточувствительности структуры $n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$.

Далее наблюдаются пики с максимумами при энергиях фотонов 1,37, 1,47, 1,65, 1,88, 2,3 и 2,62 эВ, а также пологий участок при 2,26-2,46 эВ.

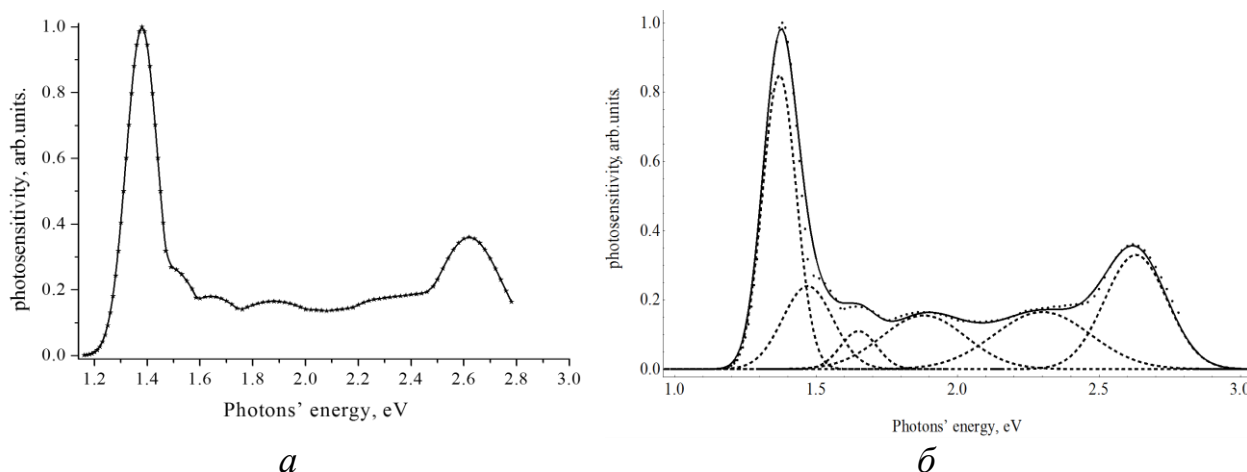


Рис. 5. Спектральная фоточувствительность $n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ гетероструктур.

***a* - эксперимент и *б* - гауссовое приближение;
сплошные кривые - суммы расчетного гауссовского спектра;
пунктирные кривые - гауссовские компоненты расчетного спектра.**

Кроме того, полученные результаты по фоточувствительности гетероструктур показали, что заметное перекрытие профилей большинства фотооткликов с различной интенсивностью, связано с близостью их энергии поглощения.

С целью глубокого изучения механизмов поглощения энергии фоточувствительность гетероструктур оценивалась по программе Wolfram Mathematics в гауссовском приближении и результаты разложены на гауссовы линии. Исходные значения энергий E_i отдельных фотопиков задавались с учетом максимумов поглощения на экспериментальной кривой. В результате оказалось, что проанализированный спектр можно описать совокупностью шести гауссовских линий со значениями E_i , отвечающими оптимальному совпадению экспериментальной и суммарной аппроксимирующей гауссовых кривых. При этом, разброс значений E_i фотопиков с табличными не превышает 0,03 эВ. Все шесть фотопиков, соответствующих гауссовым кривым, наблюдались в интервале энергий фотонов: $E_{ph,1} - 1,076 \div 1,61$ эВ, $E_{ph,2} - 1,16 \div 1,75$ эВ, $E_{ph,3} - 1,45 \div 1,84$ эВ, $E_{ph,4} - 1,48 \div 2,35$ эВ, $E_{ph,5} - 1,85 \div 2,78$ и $E_{ph,6} - 2,77 \div 3$ эВ и их максимумы выделялись при энергиях 1,37, 1,47, 1,65, 1,88, 2,3 и 2,62 эВ, соответственно (рис. 5 б).

На рис. 6, *а* и *б* представлены пространственные конфигурации тетраэдрических связей в пределах нанокластеров, образуемых примесями Ge и ZnSe на основе GaAs²².

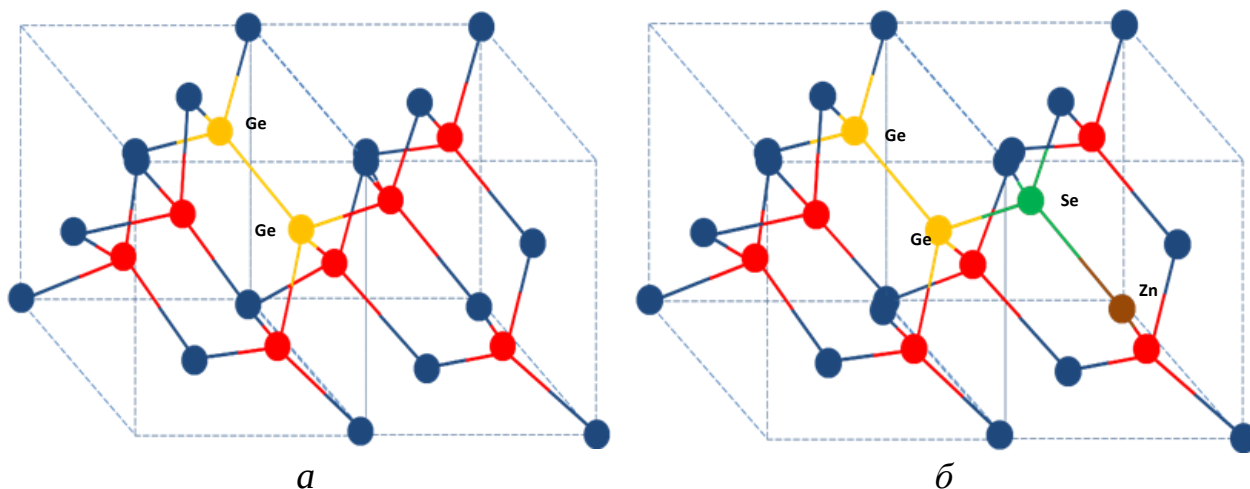


Рис. 6. Пространственная конфигурация тетраэдрических связей молекул непрерывных твердых растворов $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ (*а*) и $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ (*б*)

Как видно из рис. 6, *а* нанокластеры в твердом растворе $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ охватывают 3 As-Ge, 1 Ge-Ge и 3 Ga-Ge связей, 8 атомов Ga, Ge и As. Так как элементарная ячейка материалов с алмазоподобной структурой состоит из 8 атомов, линейный размер нанокластера 5,6 Å, почти равняется параметру решетки GaAs. А в нанокластере в твердом растворе $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$, образованном молекулой GaAs, ZnSe и Ge_2 (рис. 6, *б*) находится 14 атомов, 2 As-Ge, 1 Ge-Ge, 3 Ga-Ge, 1 Ge-Se, 3 As-Zn, 1 Zn-Se и 2 Ga-Se связей, т.е. атомы As и Ga заменяются атомами Zn и Se и поэтому линейные размеры нано-кластеров изменяются на 5,6; 5,6; 10 Å.

В нашем случае ширина запрещенной зоны соединений парных атомов Ge_2 меньше, чем ширина запрещенной зоны GaAs, также они являются запрещенно-зонными изовалентными примесями и их уровни находятся в пределах запрещенной зоны GaAs²³ (рис. 7, *а*).

Нанокластеры ZnSe в поверхностных дефектоспособных областях матричной решетки твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ содержат межатомные связи с GaAs и Ge_2 и вносят по четыре уровня в энергетической зоне GaAs. Но ширина запрещенной зоны ZnSe и его примесных комплексов больше, чем ширина запрещенной зоны GaAs и поэтому их уровни располагаются в валентной зоне (рис. 7 *б*), и они являются валентно-зонными изовалентными примесями. Так как молекулы селенида цинка и соединения селенид германия дают три акцепторных уровня в валентной зоне GaAs. Кроме того, параметр решетки ZnSe незначительно больше, чем параметр матричной

²²Саидов, М.С. Твердые растворы многокомпонентных полупроводниковых соединений с нано-дефектами и примесные вольтаические эффекты в фотоэлементах. Гелиотехника. 2006. No. 4. ст. 48–54.

²³Случанская, И.А. Основы материаловедения и технологии полупроводников. – М.: Мир, 2002. – С. 380.

решетки, поэтому на местах расположения ZnSe наблюдаются микроискажения в решетке и такие места обладают высоким потенциалом, и это способствует образованию нанокристаллов ZnSe.

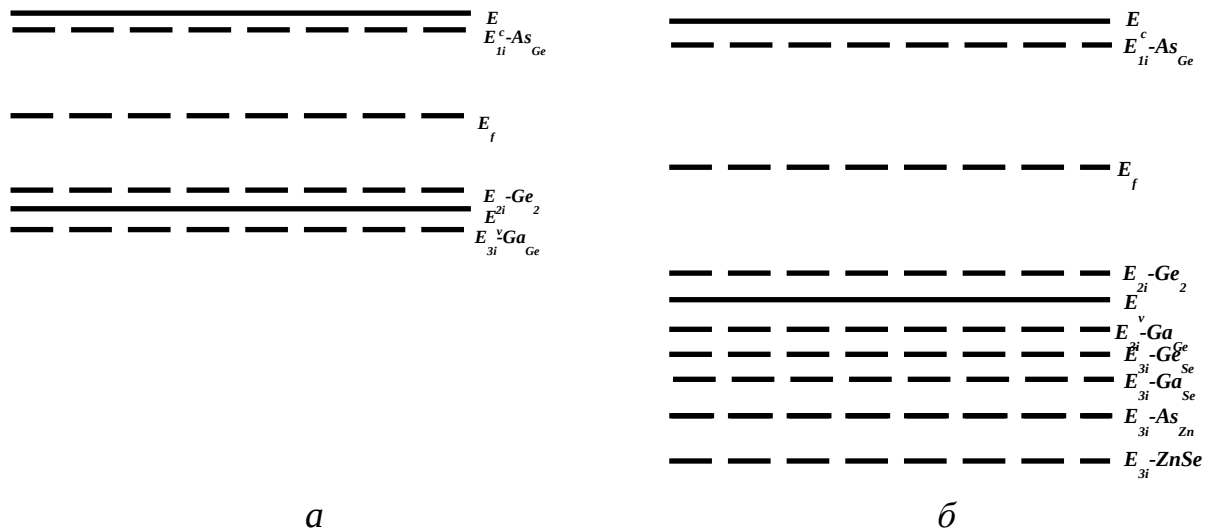


Рис.7. Количество и расположение энергетических уровней нанокластеров в твердом растворе $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ (a) и $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ (б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований структурных особенностей, электрофизических и фотоэлектрических свойств гетероструктур $n\text{-(GaAs)-}p\text{-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ сделаны следующие выводы:

1. Впервые выращены монокристаллические твердые растворы $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ ($0 \leq x \leq 0.17$, $0 \leq y \leq 0.14$) p -типа проводимости на монокристаллических $n\text{-GaAs}$ -подложках с ориентацией (100) методом жидкофазной эпитаксии из оловянного раствора - расплава.

2. Установлено, что выращенные эпитаксиальные слои твердого раствора $(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ имеют сфалеритную структуру и являются монокристаллическими, с размерами блоков 52 нм и с ориентацией (100), соответствующей ориентации подложки.

3. Выявлено, что молекулы Ge частично заменяют молекулы GaAs в дефектных областях матричной решетки на границах и приграничных областях раздела с последующей сегрегацией ионов германия с образованием нанокристаллов.

4. Установлено, что nanoостровки ZnSe в твердом растворе $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ имеют геометрическую форму *dome*, с латеральными размерами 55-65 нм и появление этих форм ZnSe nanoостровков объясняются релаксацией упругих напряжений в конфигурации *dome* фазы.

5. Установлено, что прямая ветвь вольт-амперных характеристик $J \sim V^\alpha$ гетероструктур $n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ в прямом направлении

тока состоят из нескольких участков, отличающиеся углами наклона и они обусловлены с образованием нанокристаллов Ge и ZnSe.

6. Впервые обнаружено, что квантовые точки селенида цинка и нанокристаллитов германия находятся в поверхностной области в ковалентной связи с атомами арсенида галлия в кристаллической решетке твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$, соответственно.

7. Установлено, что твердый раствор $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ обладает избирательной фоточувствительностью, обусловленной особенностями нанокристаллов Ge и ZnSe в слое $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ с отличающимися значениями энергии ионизации соответствующих молекул. Такие твердые растворы могут быть использованы как фотоактивный материал для селективного фотоприемника, работающего в ближней ИК и видимой областях спектра излучения.

**SCIENTIFIC COUNCIL No.PhD.30.08.2018.FM/T.01.12 ON
AWARD OF THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY AT THE
SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE OF SEMICONDUCTORS
PHYSICS AND MICROELECTRONICS UNDER
THE NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**

ANDIJAN STATE UNIVERSITY

BOBOEV AKRAMJON YULDASHBOEVICH

**STRUCTURAL FEATURES, ELECTROPHYSICAL AND
PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF $n\text{-(GaAs)} - p\text{-GaAs}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$
HETEROSTRUCTURES**

01.04.10 - Physics of semiconductors

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD) ON
PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Tashkent - 2019

The theme of the dissertation of Doctor of Philosophy (PhD) was registered by the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No.B2019.2.PhD/FM69.

The dissertation has been prepared at the Andijan state university.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of Scientific Council (ispm.uz) and on Information and educational portal «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Scientific supervisor:

Yulchiyev Shakhiyor Khusanovich
Candidate of Physical and Mathematical
Sciences, Assistant Professor

Official opponents:

Dadamirzaev Mukhammadjon Gulomkodiurovich
Doctor of Physical and Mathematical, Sciences, Assistant
Professor

Turgunov Nozimjon Abdumannopovich
Doctor of Physical and Mathematical,
Sciences, Assistant Professor

Leading organization:

Fergana State University

The defense of the doctoral dissertation will be held on «__» _____ 2019, at ____ at the meeting of the Scientific Council No. PhD.30.08.2018 FM/T.01.12 at the Scientific Research Institute of Physics of Semiconductors and Microelectronics under the National University of Uzbekistan (Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Toshkent city, Uzbekistan. Tel. (99871) 248-79-94; fax: (99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz, Conference Hall of the SRIPSM under the NUU).

The doctoral dissertation can be looked through in the ICT Implementation Unit (registered under № ____). Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Toshkent city, Uzbekistan. Tel. (99871) 248-79-59, e-mail: info@ispm.uz.

The abstract of the dissertation was distributed on «__» _____ 2019.
(Registry record No. _____ dated «__» _____ 2019).

Sh.B. Utamuradova

Chairman of Scientific Council
on Award of Scientific Degrees,
Doctor of Physical and Mathematical,
Sciences, Professor

S.S. Nasriddinov

Scientific Secretary of Scientific Council
on Award of Scientific Degrees, Doctor of
Technical Sciences, Assistant Professor

A.T. Mamadalimov

Chairman of Scientific Seminar of the
Scientific Council on Award of Scientific
Degrees, Doctor of Physical and Mathematical
Sciences, Academician

INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

The purpose of research work is to research structural features, electrophysical and photoelectric properties of $n\text{-(GaAs)}_x\text{-p-GaAs}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ heterostructures.

Research tasks:

to determine the optimal growth conditions for the epitaxial solid solution of $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ from tin solution-melt and to study of their electric properties;

to research the structural features of the grown of film solid solutions $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$;

to investigate the formation mechanisms and properties of Ge and ZnSe nanocrystals on the surface of the $\text{GaAs}_{1-x}\text{Ge}_{2x}$ buffer layer;

to study the surface states of the grown epitaxial film $(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ and the determination of the geometric shape of the distribution and density of the ZnSe nanoislands;

to research the electrical and photoelectric properties of multilayer $n\text{-GaAs-p-GaAs}_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ heterostructures.

The object of the research work is solid solutions $(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ and p-n junctions on the based of them.

The subject of the research work. Identification of structural perfection, determination of the fundamental parameters of $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ solid solutions and identification of patterns of current passage mechanisms in $n\text{-GaAs-p-GaAs}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ heterostructures and the formation of their spectral sensitivity.

The scientific novelty of the research work is below:

First time, grown single-crystal solid solutions of $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ ($0 \leq x \leq 0.17$, $0 \leq y \leq 0.14$) with p-type conductivity on n-GaAs substrates with orientation (100) by the method of liquid phase epitaxy from tin solution-melt;

It was scientifically proven that the grown epitaxial layers of $(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ solid solution have the sphalerite structure and are single-crystal, with block size of 52 nm and orientation (100);

It was revealed that Ge molecules partially replace GaAs molecules in the defective regions of the matrix lattice at the boundaries regions of the section with the subsequent segregation of germanium ions with the formation of 44 nm nanocrystals;

The first time, it was found that nanoislets of zinc selenium with a size of 59 nm are formed in the near-surface region of the $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ solid solution;

It was determined that the density, shape, and size of quantum nanoobjects depend on the technological modes (range of the growing temperature, cooling rate);

It is shown that the direct branch of the current-voltage characteristics of $J \sim V^\alpha$ $n\text{-GaAs-p-GaAs}_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ heterostructures in the forward direction of

the current consists of several sections that differ in angles of inclination and they are caused by the formation of Ge and ZnSe nanocrystals;

It was found that the $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ solid solution has a selective photosensitivity due to Ge and ZnSe nanocrystallites in the $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x$ layer with different ionization energies of the respective molecules.

Implementation of the research results.

The method of determining the geometric shapes and sizes of ZnSe nanoobjects and identifying their formation mechanisms, as well as characterizing the current flow of ZnSe nanocrystals, was used in Karakalpak State University project No. F-2-37 (2012-2016) on the topic "Feature of nonlinear laser-induced processes in semiconductors" (Certificate of the Ministry of Higher and Secondary Special Education of the Republic of Uzbekistan for the number 89-03-2001 in May 24, 2018).

Method for determining the effect of a growing temperature interval, cooling rate and technological regimes on the formation of quantum nanoobjects, their densities, shapes and sizes was used in project No. F2-FA-F120 (2012-2016) was applied on the subject "Electronic properties of radiation modification of low-dimensional high-temperature superconductors, semiconductor heterostructures, metals and their oxides" (Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan No. 2/1255-1772 in 24 June 2019).

Approbation of research results. The main results of the dissertation were presented and discussed at 4 international and 4 republican scientific conferences.

Publication of research results. On the subject of the dissertation, 8 scientific papers were published in journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publication of the main scientific results of dissertation works.

The structure and scope of the disertation. The research work consists of introduction, four chapters, a conclusion. It is presented on 121 pages, including 13 figures, 5 tables, contains 100 literatures.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS
I бўлим (1 часть; part 1)

1. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Усмонов Ж.Н. Влияние нанокристаллов германия и селенида цинка на фотоэлектрические свойства гетероструктуры $n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{0,69}(\text{Ge}_2)_{0,17}(\text{ZnSe})_{0,14}$. // Альтернативная энергетика и экология. - Саров, 2019. - №10-12. - С. 43-51 (01.00.00 №9. IF: 0.1).

2. Зайнабидинов С.З., Йулчиев Ш.Х., Бобоев А.Й., Махмудов Х.А., Кучкарова М. Особенности выращивания эпитаксиального слоя твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$. // Научный вестник АндГУ.- Андижон, 2019. - № 1. - С. 5-8 (01.00.00 № 13).

3. Зайнабидинов С.З., Саидов А.С., Бобоев А.Й., Усмонов Ж.Н., Йулчиев Ш.Х. Определение оптимальных технологических условий выращивания эпитаксиальных слоев $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ методом жидкостной эпитаксии. // Научный вестник АндГУ. - Андижон, 2018. - № 3. - С. 15–18 (01.00.00 № 13).

4. Зайнабидинов С.З., Лейдерман А.Ю., Бобоев А.Й., Мансуров Х.Ж., Усмонов Ж.Н. Механизм токопрохождения в $n\text{-GaP-}p\text{-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ гетероструктуре. // Доклады Академии Наук. - Тошкент, 2018. - № 5. - С. 49-52 (01.00.00 № 7).

5. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й. Морфологические исследования особенностей nanoостровков ZnSe на поверхности твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$. // Доклады Академии Наук. - Тошкент, 2018. - № 4. - С. 17-21 (01.00.00 № 7).

6. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Лейдерман А.Ю. Исследование механизма переноса тока в $n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ гетероструктур. //Узбекский физический журнал.-Тошкент, 2019. -№1. -С.14-21 (01.00.00 № 5).

7. Зайнабидинов С.З., Йулчиев Ш.Х., Бобоев А.Й., Мансуров Х.Ж., Усмонов Ж.Н. Получение и исследование полупроводниковых эпитаксиальных гетероструктур с квантовыми точками. // Научный вестник АндГУ. - Андижон, 2018. - № 4. - С. 11-13 (01.00.00 № 13).

8. S.Z. Zainabidinov, H.J. Mansurov, A.Y. Boboev and Kh.A. Makhmudov. Structural features as the solid solution $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ with quantum dots ($0 \leq x \leq 0.17$); ($0 \leq y \leq 0.14$) // Semiconductor physics and microelectronics. 2019.- No.1(0.1).-P, 11-14 (01.00.00 № 19)

II бўлим (2 часть; part 2)

9. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Йулчиев Ш.Х., Усмонов Ж.Н. Исследования структуры и поверхностных состояний твердого раствора $(\text{GaAs})_{0,69}(\text{Ge}_2)_{0,17}(\text{ZnSe})_{0,14}$. // Доклады Академии Наук. - Тошкент, 2019. - № 2, (принят к печати) (01.00.00 № 7).

10. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Мансуров Х.Ж., Усмонов Ж.Н. Химико-технологические особенности создания многослойных полупроводниковых структур. “Физикани ўқитишнинг долзарб муаммалари”. // Респ.илм-амал.анжум. Наманган, - 2018. - С. 59-61.

11. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Усмонов Ж.Н. Влияние нанокристаллов германия и селенида цинка на фотоэлектрические свойства гетероструктур $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{0.69}(\text{Ge})_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ «Использование возобновляемых источников энергии: новые исследования, технологии и инновационные подходы». // Матер. Респ. науч.-практ.конф. -Тошкент, 2018. - С. 83-86.

12. Зайнабидинов С.З., Йулчиев Ш.Х., Бобоев А.Й., Мансуров Х.Ж., Усмонов Ж.Н. Полупроводниковый твердый раствор $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ с квантовыми точками. “Замонавий ишлаб чиқаришнинг иш самарадорлиги ва энерго-ресурс тежамкорлигини ошириш муаммолари”. // Халқаро илм.-амал. конф. матер. - Андижон, 2018. - С. 5-8.

13. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Мансуров Х.Ж. Structural features of the solid solution $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ with quantum dots ($0 \leq x \leq 0,17$; $0 \leq y \leq 0,14$). Современные проблемы физики полупроводников. // Матер.респ.науч- практ.конф. - Тошкент, 2018. -С. 11-13.

14. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й. Электрофизические свойства $n\text{GaAs-p}(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ гетероструктур. «Инновационные технологии в науке и образовании». //Матер.респ.науч- практ.конф. - Нукус, 2018. -С. 36-40.

15. Boboev A., Usmonov J., Makhmudov Kh., Ergashev B., Yunusaliyev N., Tojimumhammadov A. Influence of temperature on current-voltage characteristics of $n\text{-GaAs-p}(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{ZnSe})_x(\text{Ge}_2)_y$ heterostructures. // Proceedings of the ICECRS “Generating Knowledge through Research”. -Malaysia, 2019. -P. 66-69.

16. Зайнабидинов С.З., Йулчиев Ш.Х., Бобоев А.Й., Усмонов Ж.Н., Махмудов Х.А. Structural characteristics of $n\text{-GaAs-p}(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ heterostructures.«Инновационные идеи, разработки и современные проблемы их применения в производстве а также в обучении». // Матер.международ.науч- практ.конф. - Андижан, 2019. -С. 252-253.

17. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Йулчиев Ш.Х. Температурные зависимости электрических свойств $n\text{GaAs-p}(\text{GaAs})_{0,3}(\text{ZnSe})_{0,47}(\text{Ge}_2)_{0,23}$ ($0 \leq x \leq 0.47$, $0 \leq y \leq 0.23$) гетероструктур. // Труды 1-Международного конгресса тюркского мира по естественным наукам и медицине.-Ош, 2019. -С. 86-87.

18. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Усмонов Ж.Н., Махмудов Х.А. Особенности электрофизических свойств $p\text{-}n$ гетероструктур на основе непрерывного твердого раствора $n\text{-Ge-p} - (\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_x(\text{ZnSe})_y$. // Труды 1-Международного конгресса тюркского мира по естественным наукам и медицине. -Ош, 2019. -С 280-281.

19. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й. Semiconductor solid solution $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ with quantum dots. «Физика возобновляемых источников энергии и устойчивой окружающей среды». // Матер.респ.науч-практ.конф. – Карши, 2019. -С. 50-51.

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали таҳририятида тахрирдан ўтказилиб, ўзбек ва рус тилларидаги матнлар ўзаро мувофиқлаштирилди. (24.08.2019 йил).

Босишга рухсат этилди 08.08.2019. Ҳажми 3 босма табок.
Бичими 60x801/16. Адади 85 нусха. Буюртма 168.
М.Улуғбек номидаги Ўзбекистон Миллий Университети
босмахонасида чоп этилди

